DICIEMBRE 2009

INVESTIGACION Y CIENCIA



Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

ENERGIA
¿Cuándo se agotará el petróleo?

GENETICA
Versatilidad del ribosoma

ASTRONOMIA
Agujeros negros, ¿existen realmente?

MATERIALES
Más duros que el diamante

www.investigacionyciencia.es

6,00 EUROS

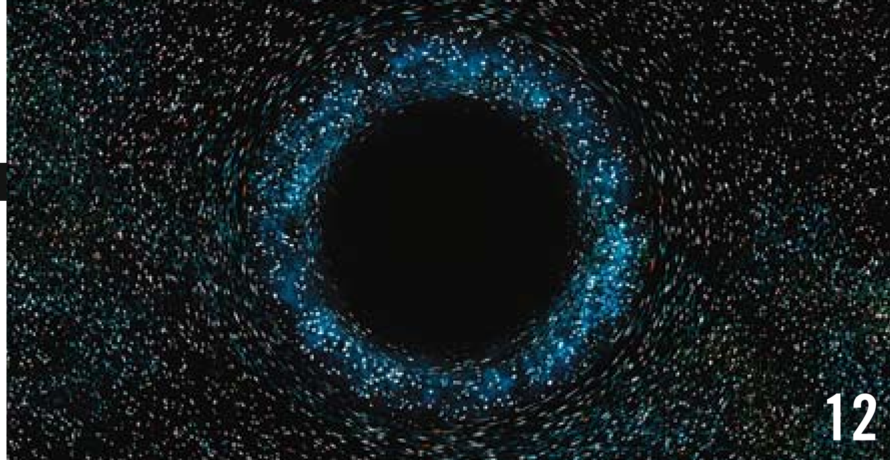
POTENCIADORES DEL CEREBRO

Entre la farmacología y la neuroética



SUMARIO

Diciembre de 2009/ Número 399



Parecen agujeros negros, pero podría tratarse de otro tipo de objetos extraños.



Se puede obtener crudo de zonas antaño inaccesibles o cuya perforación no resultaba rentable.



La Amazonía estuvo más urbanizada de lo que se pensaba.

ARTICULOS

ASTROFISICA

12 Estrellas negras

Carlos Barceló, Stefano Liberati, Sebastiano Sonego y Matt Visser

Los efectos cuánticos podrían impedir la formación de agujeros negros genuinos. En su lugar se crearían unos cuerpos muy densos, las estrellas negras.

NEUROCIENCIA

20 Potenciadores de la cognición

Gary Stix

¿Bastará ingerir una píldora con el desayuno para mejorar la concentración y la memoria, sin detrimento de la salud a largo plazo?

ENERGIA

28 Explotación de las reservas de petróleo

Leonardo Maugeri

Técnicas avanzadas extraerían hasta la última gota.

ARQUEOLOGIA

40 Las ciudades perdidas del Amazonas

Michael J. Heckenberger

La selva tropical del Amazonas no es tan salvaje como parece.

BIOLOGIA

48 El ribosoma y la traducción genética

Daniel A. Colón Ramos y Antón Vila Sanjurjo

El alto grado de conservación del ribosoma en todos los organismos indica que su temprana aparición fue crucial para el desarrollo de la vida. Además de traducir la información genética en proteínas, participa en la regulación de la expresión génica.

MEDICINA

58 Pasado, presente y futuro de las vacunas

Nathalie Garçon y Michel Goldman

Los conocimientos modernos sobre el sistema inmunitario han reavivado el interés por añadir ingredientes que permitan mejorar antiguas vacunas y crear otras nuevas.



20

Fármacos que aumentan el rendimiento mental. ¿Tratamiento o negocio?



66

Galileo demostró talento artístico en sus ilustraciones de manchas solares.



74

Se pueden crear materiales más duros que el diamante.

HISTORIA

66 La investigación del Sol en la época de Galileo

Horst Bredekamp

Galileo miró con ojo de artista a través del telescopio. No es casual que pintores afamados compartiesen con Galileo un modo de contemplar la naturaleza.

MATERIALES

74 Más duro que el diamante

Daniel Errandonea

Con altas presiones pueden conseguirse materiales sintéticos ultraduros con múltiples aplicaciones potenciales.

SEGURIDAD

82 Privacidad e Internet cuántica

Seth Lloyd

Gracias a algunas de las más extrañas leyes de la física, tal vez podamos algún día buscar o navegar por la Red sin que nadie vaya recopilando datos nuestros.

SECCIONES

3 HACE...
50, 100 y 150 años.

4 APUNTES
Biología...Geología... Evolución... Medicina.

6 CIENCIA Y SOCIEDAD
El eslabón débil... Nanomotores térmicos... El problema de la coincidencia cósmica... Energía y medio ambiente.

36 DE CERCA
Historia de una invasión, por *Dacha Atienza y Verónica Fuentes*

38 DESARROLLO SOSTENIBLE
La crisis de la gestión pública en EE.UU., por *Jeffrey D. Sachs*

39 CIENCIA Y GASTRONOMIA
El jamón curado, por *Fidel Toldrá Vilardell*

88 CURIOSIDADES DE LA FISICA
Ya llega la energía litoeléctrica, por *Jean-Michel Courty y Edouard Kierlik*

90 JUEGOS MATEMATICOS
El teorema de Banach-Tarski, por *Agustín Rayo*

92 LIBROS
Cierre del año Darwin

94 INDICE ANUAL

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
Laia Torres Casas
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

ACTING EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
CHIEF NEWS EDITOR Philip M. Yam
SENIOR WRITER Gary Stix
EDITORS Davide Castelvecchi, Graham P. Collins, Mark Fischetti, Steve Mirsky, Michael Moyer, George Musser, Christine Soares, Kate Wong
CONTRIBUTING EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Stuart F. Brown, W. Wayt Gibbs, Marguerite Holloway, Christie Nicholson, Michelle Press, John Rennie, Michael Shermer, Sarah Simpson
ART DIRECTOR Edward Bell
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
VICE PRESIDENT, OPERATIONS AND ADMINISTRATION Frances Newburg
VICE PRESIDENT, FINANCE AND GENERAL MANAGER Michael Florek

DISTRIBUCION
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid) - Teléfono 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª - 08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Teresa Martí Marco
Muntaner, 339 pral. 1.ª 08021 Barcelona
Tel. 934 143 344 - Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

M.ª Rosa Zapatero Osorio: *Estrellas negras*; Luis Bou: *Potenciadores de la cognición*, *Privacidad e Internet cuántica*; Joandomènec Ros: *Las ciudades perdidas del Amazonas*; Juan Manuel González Mañas: *Pasado, presente y futuro de las vacunas*; Ernesto Lozano Tellechea: *La investigación del Sol en la época de Galileo*; J. Vilardell: *Hace...*, *Curiosidades de la física*; Anna Ferran: *Apuntes*; Bruno Moreno: *Ciencia y sociedad*; Marián Beltrán: *Desarrollo sostenible*



Portada: SplashLight

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	65,00 euro	120,00 euro
Resto del mundo	100,00 euro	190,00 euro

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Printer Industria Gráfica Ctra. N-II, km 600 - 08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

...cincuenta años

La otra cara. «La primera, y confusa, visión que de la otra cara de la Luna hemos tenido los humanos sugiere que las actuales teorías acerca del origen e historia de nuestro satélite natural acaso precisen revisión. El vehículo soviético lanzado el 3 de octubre se cruzó con la órbita lunar al cabo de tres días. Poco después, respondiendo a radioseñales enviadas desde la Tierra, apuntó a la Luna sus dos cámaras e hizo las fotografías. Estas se revelaron en el mismo vehículo y se enviaron por radio a la Tierra. Una de ellas se hizo pública en Moscú el 27 de octubre. Se veían en ella varios cráteres de dimensiones considerables, así como una cadena montañosa de extraña topografía (que los trabajadores soviéticos han bautizado Montañas Soviéticas).»

[NOTA: Las "montañas" resultaron ser proyecciones de materia eyectada desde los cráteres y eran más bien planas.]

Grasa corporal. «Para muchos autores, el comer en exceso es lo mismo que ganar peso, y no se hace ningún intento para explicar qué procesos intervienen. Pero para comprender la obesidad hay que identificar esos procesos. Estudios recientes han mostrado que el tejido adiposo es algo más que el depósito a donde va a parar la comida sobrante. Está vivo y participa activamente en el metabolismo del cuerpo. Convierte en grasa porciones sustanciales del azúcar y el almidón de la dieta, incluso en las personan de peso constante. Estrangula el flujo energético corporal ajustando a la necesidad de las células activas la descarga de ácidos grasos. Reacciona a las hormonas, que integran su actuación en las funciones coordinadas del organismo. Puesto que la obesidad afecta a todos esos procesos que se dan en el tejido adiposo, parece insuficiente una teoría de esta enfermedad basada sólo en la sobrealimentación.

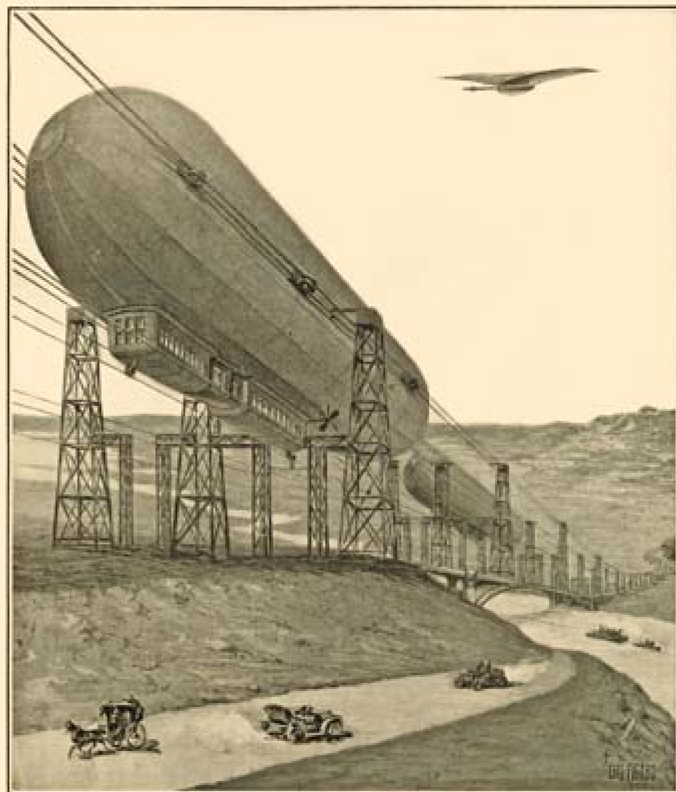
—Vicent P. Dole»

...cien años

Ferrocarril aéreo. «Un ingeniero alemán, de nombre Leps, ha ideado un novedoso medio de transporte, pero tan impracticable que maravilla: una suerte de cruce entre aeronave y ferrocarril eléctrico, en el cual un globo soporta el peso de los coches de viajeros, que corren sobre cables aéreos y están movidos por electricidad (*véase la ilustración*). El globo es rígido, de tipo Zeppelin, y está movido por motores eléctricos que desarrollan una velocidad aerodinámica del orden de 200 kilómetros por hora. Al sistema de Leps se oponen objeciones técnicas y financieras.»

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CI, N.º 23; 4 DE DICIEMBRE DE 1909

El timo de las bombillas. «Publicaciones técnicas inglesas han estado previniendo a los compradores de bombillas eléctricas de incandescencia contra los timadores que instalan lámparas que supuestamente contienen filamentos metálicos pero que no tardan en mostrarse como lámparas de filamento de carbono de muy corta duración. Esas bombillas, recién instaladas, desprenden una luz brillante y aparentan ser muy económicas cuando se comprueban con el amperímetro del agente, pero no tardan en ennegrecerse, su luminosidad disminuye y en poco tiempo se rompen. El vidrio de esas bombillas es deslustrado, por lo que el comprador no puede ver el pretendido filamento metálico.»



EL FERROCARRIL DE ZEPPELIN combina las técnicas del dirigible y el ferrocarril, 1909.

...ciento cincuenta años

Aceite de ballena. «En 1820, el número de barcos ingleses y escoceses que participaban en la pesca de la ballena en los mares árticos ascendía a 156 y la producción anual de aceite era de 18.725 toneles [unos 17.862 metros cúbicos]. A causa de la creciente dificultad para cazar ballenas y la rápida adopción del gas para el alumbrado callejero y fabril, la actividad ballenera llegó entonces casi a desaparecer. Las embarcaciones antiguas se vendieron para transportar carbón; se sacrificaron muchísimas propiedades. Durante los últimos años, empero, el negocio parece reverdecer, pese a que actualmente se fabrican y venden enormes cantidades de aceite de hulla. Se cree que el aceite de ballena, especialmente el esperma, sigue siendo superior a todos los demás ungüentos lubricantes de máquinas; por ello, dadas las grandes cantidades que se requieren para los ferrocarriles y otros usos, hay buenas razones que incitan a dedicarse a la caza de ballenas.»

BIOLOGIA

La evolución no va marcha atrás

La evolución no es reversible. Cuando un carácter ha recorrido un determinado camino evolutivo, no puede volver sobre sus pasos aunque la presión evolutiva se invierta.

Hace mucho que se debate sobre el grado en que la evolución puede revertirse. Los intentos de estudiar la cuestión con caracteres complejos, como las aletas de las ballenas, han quedado en nada por diversas dificultades; no es la menor llegar a saber cuál fue el estado ancestral del carácter. El equipo de Joseph Thornton, de la Universidad de Oregón en Eugene, ha superado este obstáculo investigando una proteína, el receptor de los glucocorticoides, cuya historia evolutiva en los vertebrados habían establecido con anterioridad.

La proteína actual responde sólo al cortisol. Thornton había determinado ya que la forma ancestral, de hace 440 millones de años, de cuando se separaron los peces óseos de los cartilaginosos, reaccionaba también a la aldosterona. Perdió esta capacidad 40 millones de años después, en los antepasados de los artrópodos, tras la mutación de 37 aminoácidos.

Thornton ha descubierto que la exclusividad de la reacción al cortisol se debe a sólo dos de esas sustituciones. Pero, como explica en *Nature*, devolver el par de aminoácidos a la versión original no trae consigo el antiguo fenotipo: la proteína deja de funcionar. La causa se encuentra en otros cinco aminoácidos mutados, que vuelven inestable la proteína cuando recupera la vieja estructura. Para obtener una proteína capaz de realizar la función ancestral habría que devolver también esos cinco aminoácidos a su estado precedente, pero es muy difícil que ocurra en la naturaleza, ya que sus mutaciones no confieren de por sí ventajas selectivas.

Por tanto, si una presión selectiva favoreciese el reconocer, como antaño, ambas hormonas, el receptor quizá pudiese retomar la antigua función con un mecanismo nuevo, pero no recorrería hacia atrás su trayecto evolutivo. “Equivaldría molecularmente —explica Thornton— a la convergencia evolutiva de los organismos, al retorno aparente a una vieja morfología, pero con una estructura interna muy distinta.” Así ocurre, por ejemplo, con la semejanza exterior de las aletas de las ballenas y de los peces.

—Giovanni Sabato

GEOLOGIA

Paleocolapsos submarinos en Mallorca

Se han descubierto en la isla de Mallorca más de 200 colapsos que se desarrollaron al final del Mioceno superior (Messinense), hace unos seis millones de años. Pueden considerarse el mayor episodio de hundimientos del planeta descrito hasta la fecha; corresponden a uno de los procesos geológicos más críticos de la historia de la Tierra.

Estos paleocolapsos pueden observarse en las costas sur y este de Mallorca. Su exposición en los acantilados costeros es extraordinaria y espectacular. Destacan por sus dimensiones (hasta 500 metros cuadrados de superficie en planta y unos 35 metros de altura), densidad y formas peculiares en sección. Esas formas fósiles de hundimientos están estrechamente ligadas al desarrollo de una de las mayores plataformas arrecifales del Mediterráneo occidental.

Durante el final del Mioceno Superior, las fluctuaciones del nivel del mar controlaban el crecimiento y la posición de los arrecifes coralinos, que se disolvían fácilmente por la acción de las aguas subterráneas agresivas. Según el modelo genético propuesto, los hundimientos se produjeron debido a la formación previa, por disolución de los parches de coral bajo un clima tropical-subtropical, de un extenso sistema de cavidades. Esas cuevas colapsaron y sobre ellas se hundieron grandes volúmenes de rocas cuando todavía no estaban completamente litificadas y en condiciones submarinas.



El modelo genético explica también que el origen de los paleocolapsos guarda una estrecha relación con la alta frecuencia de fluctuación del nivel del mar en el transcurso de ese período geológico. Durante las bajadas del nivel del mar se formó el sistema de cavidades; durante las subidas, se hundieron los techos de las cuevas por la carga inducida de los depósitos sedimentarios posteriores.

Los estudios de porosidad llevados a cabo en los paleocolapsos ponen de manifiesto que estas estructuras revisten un gran interés por ser potenciales reservorios de hidrocarburos, aguas subterráneas, otros fluidos o gases. La investigación de este episodio geológico arroja luz sobre la historia geológica del planeta (sobre todo los eventos climáticos críticos) y facilita el aprovechamiento de los recursos naturales.

—Pedro A. Robledo
Instituto Geológico y Minero de España

EVOLUCION

Estructura, fuerza y almacenamiento

En la era Cámbrica, que empezó hace unos 540 millones de años, toda la vida residía en el océano. Casi todos los seres vivos debían de estar provistos de algún tipo de armadura, rematada con un casco espinoso. Los antepasados de los insectos y crustáceos presentaban exoesqueletos completos, probablemente formados por una mezcla de proteína y quitina, como el caparazón de las langostas actuales. Moluscos y organismos semejantes a estrellas de mar fabricaban su exoesqueleto a partir del carbonato cálcico que extraían del agua del mar. Incluso una línea evolutiva de peces que se extinguieron, los ostracodermos, se las componían para nadar aun estando recubiertos de escamas y placas pesadas hechas de hueso verdadero (cartílago mineralizado rico en calcio y fosfatos).



SECCION de una cabeza de fémur.

No obstante, fueron los organismos blandos y apacibles de este período los primeros que desarrollaron huesos internos. Animales vermiformes, como los conodontos, empezaron por mineralizar el cartílago que envolvía su médula espinal primitiva y se convirtieron así en los primeros vertebrados. A continuación aparecieron las cubiertas craneales óseas; pronto siguieron el ejemplo otros seres con esqueletos cartilaginosos internos más extensos. Debido a que esos animales nadadores se servían de contracciones musculares para impulsarse, la sujeción de los músculos a hueso firme les debió de proporcionar mayor fuerza. El esqueleto endurecido también ofrecía un sostén más sólido a los cuerpos; les permitió crecer más y diversificarse, y desarrollar extremidades.

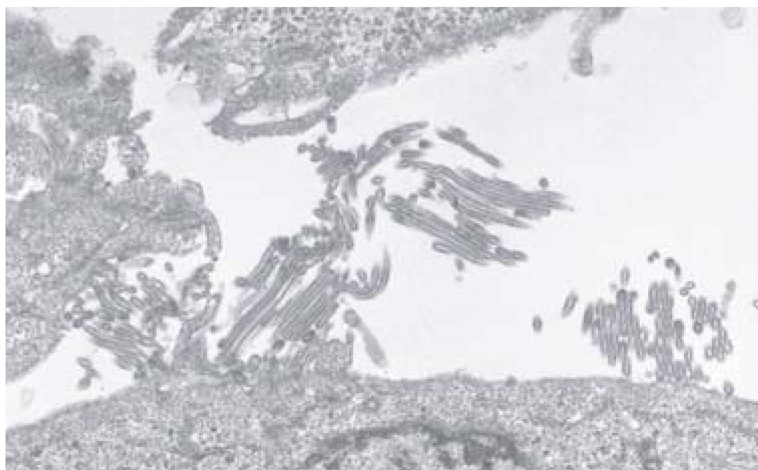
Su utilidad como almacén de minerales esenciales (en especial el calcio) de gran capacidad y reactividad, probablemente surgió más tarde en la evolución, pero en la actualidad es una de las funciones más importantes del esqueleto humano. Sin calcio, el corazón no latiría y las neuronas no transmitirían impulsos. Lejos de ser inerte, el hueso experimenta un flujo constante entre crecimiento y autodestrucción para satisfacer las necesidades corporales y mantener su estructura. Los osteoclastos (células "destructoras de hueso") descomponen el tejido óseo viejo o muerto; los osteoblastos ("formadoras de hueso") dan origen a nuevas células óseas. Con su actuación conjunta, esas células renuevan alrededor de un 10 por ciento del esqueleto cada año. A corto plazo, si las concentraciones de calcio en la sangre son demasiado bajas, los osteoclastos destruyen hueso para liberar el mineral. A la inversa, si el ejercicio físico produce un mayor desarrollo de los músculos, los osteoblastos se activan y construyen hueso nuevo que resista su tensión.

—*Christine Soares*

MEDICINA

La virulencia de la nueva cepa de la gripe A(H1N1)

El equipo de Ten Feizi, del Colegio Imperial de Londres, ha descubierto un mecanismo que explicaría por qué la cepa de 2009 del virus A(H1N1) de la gripe es a veces más virulenta que la gripe estacional. Los virus de la gripe infectan las células del aparato respiratorio cuando se unen a ciertos receptores, consistentes en moléculas de ácido siálico ligadas a una molécula de galactosa mediante enlaces de los tipos alfa-2,6 y alfa-2,3. Sin embargo, mientras que el virus estacional se une a los receptores alfa-2,6 presentes sobre las células de la parte alta del aparato respiratorio, el virus A(H1N1) se liga también a los receptores alfa-2,3 del aparato respiratorio inferior, lo que causa infecciones más graves.



VIRUS DE LA CEPA DE 2009 DE LA GRIPE A(H1N1) en células de riñón caninas infectadas. La imagen está tomada con un microscopio electrónico.

También deben de intervenir factores variables. El grupo de Béatrice Riteau, del Instituto Nacional de Investigación Agronómica de Jouy-en-Josas, en Versalles, ha demostrado que distintas cepas de la gripe A desencadenan en las células de los alvéolos pulmonares la producción de moléculas HLA-G "inmunosubversivas", inhibidoras de las reacciones inmunitarias, pero no en un mismo grado. Cuando las células infectadas fabrican esas moléculas deja el sistema inmunitario de reconocerlas, por lo que no las destruye. Las moléculas HLA-G se sintetizan sobre todo durante el embarazo: el descubrimiento explicaría también, pues, que las mujeres encinta sean más vulnerables al virus.

—*Jean-Jacques Perrier*

Errata corrige

En el artículo "Los orígenes del telescopio", del mes de septiembre, en la página 59, donde pone Girolamo Sirtoris debería haberse puesto Girolamo Sirtori.
En la sección "Puesta al día" del mes de octubre, se habla de un dispositivo de memoria basado en nanotubos de carbono. La investigación no se publicó en *Nano Letters* del 10 de junio, sino del 13 de mayo.

El eslabón débil

Escepticismo acerca de que un fósil descubierto hace poco sea, como se ha dicho, un eslabón perdido de la evolución humana

El 19 de mayo, el mundo supo del esqueleto fósil de un primate, del tamaño de un gato, que vivió hace cuarenta y siete millones de años en una selva en lo que ahora es Alemania. Este espécimen, una hembra joven, representa un género y una especie nuevos para la ciencia, *Darwinius masillae*, aunque los investigadores que lo descubrieron, como buenos publicistas, le asignaron rápidamente un nombre más sencillo: Ida. Y, en una elaborada campaña de relaciones públicas, en virtud de la cual se programó la publicación simultánea de una página web, de un libro, de un documental en *History Channel* y del estudio científico que describía el descubrimiento en *PLoS ONE*, se dijo que Ida era el eslabón perdido entre los seres humanos y nuestros parientes primates. En informativos televisados, los miembros del equipo llamaron a Ida la “octava maravilla del mundo”, el “Santo Grial” y la “Piedra Rosetta”.

Esta orquestación dio sus frutos, ya que Ida apareció en la primera plana de innumerables periódicos y en los telediarios. Hasta medios especializados en el chismorreo recogieron la noticia. Y Google incorporó la imagen del fósil a su logotipo de la página principal de búsqueda durante un día entero.

Sin embargo, diversos expertos han criticado estas pretensiones. No sólo Ida es demasiado antigua como para revelar nada sobre la evolución de los seres humanos en particular (los supuestos ancestros humanos más antiguos sólo tienen siete millones de años de antigüedad), sino que es posible que ni siquiera esté emparentada de forma especialmente estrecha con la rama antropoide del árbol genealógico de los primates, que incluye a los monos, a los gibones, a los grandes simios y a nosotros mismos.

Hace mucho que se debate sobre el origen de los antropoides, también llamados primates superiores. La opinión más extendida supone que un grupo de animales parecidos a los tarsiformes, los omomiformes, dio lugar a los antropoides. Sin embargo, algunos expertos creen que los antropoides surgieron más bien a partir de un grupo de primates extintos, los adapiformes.



Primate primitivo. *Darwinius masillae* vivió hace 47 millones de años. Los científicos que describieron el fósil apodado Ida afirman que algunos rasgos clave vinculan a Ida con el grupo de primates que incluye a los monos, los gibones, los grandes simios y los seres humanos. Sin embargo, otros investigadores señalan que está más estrechamente emparentada con el grupo que incluye a los lémures, los gálagos y los loris.

FUENTE: “COMPLETE PRIMATE SKELETON FROM THE MIDDLE EOCENE OF MESSEL IN GERMANY: MORPHOLOGY AND PALEOBIOLOGY”, POR JENS L. FRANZEN ET AL., EN *PLoS ONE*, VOL. 4, N.º 5; MAYO DE 2009

Cuando se descubrió el fósil de Ida, Jørn H. Hurum, paleontólogo de la Universidad de Oslo, y su equipo lo clasificaron como un adapiforme y afirmaron que también exhibía diversas características similares a las de los antropoides, como los incisivos en forma de espátula, la ausencia de la garra de acicalamiento en el segundo dedo de la pata y una mandíbula inferior parcialmente fusionada. Este equipo de investigadores considera que Ida podría integrarse en la línea que lleva a los antropoides, con lo que vincularía a ese grupo con el de los adapiformes.

Los que rechazan esta postura admiten que Ida es un adapiforme, pero niegan los supuestos vínculos con los antropoides. Robert Martin, del Museo Field de Chicago, afirma que algunos de los rasgos utilizados para relacionar a Ida con los antropoides no respaldan en realidad esa relación. La fusión de la mandíbula inferior, por ejemplo, no está presente en los antropoides inequívocos más antiguos, lo cual sugiere que no se trata de una característica ancestral de este grupo. Además, el rasgo ha surgido independientemente en varias líneas evolutivas de mamíferos, incluyendo algunos lémures, por evolución convergente.

Robert Martin señala también que a Ida le falta una característica definitoria de los antropoides: una pared ósea en la parte posterior de la cuenca ocular. “Estoy totalmente convencido de que *Darwinius* no tiene absolutamente nada que ver con el origen de los primates superiores”, declara.

Los adapiformes “están relacionados con el grupo estrepsirrino de primates actuales, que incluye a los lémures de Madagascar y a los gálagos y loris de Africa y Asia”, asevera Richard F. Kay, paleontólogo de la Universidad de Duke. A pesar de las pretensiones de los autores, añade, “ciertamente no están en la línea evolutiva directa que lleva a los mo-

nos, gibones, grandes simios y humanos actuales". Kay y otros consideran que un primate primitivo de China, *Eosimias*, es mejor candidato a ser el antepasado de los antropoides que *Darwinius*.

[Según un artículo publicado en *Nature* en octubre, cuyo primer autor es Erik Seiffert, de la Universidad de Stony Brook de Nueva York, un fósil de hace 37 millones de años, hallado en Egipto y atribuido a una nueva especie, *Afradapis longicristatus*, favorece la hipótesis de que *Darwinius* pertenece a la rama evolutiva de lémures y loris, no a la de los antropoides.]

Si los detractores están en lo cierto, Ida es irrelevante en lo referente a los orígenes de los antropoides y, por lo tanto, de los seres humanos. Sin embargo, eso no significa que carezca de valor. A diferencia de *Eosimias*, al que sólo se conoce por sus dientes y mandíbulas fósiles, los restos de Ida están espectacularmente completos. Se ha conservado la totalidad de su esqueleto, así como indicios de su última comida e impresiones del contorno de su cuerpo y de su piel. El equipo de Hurum ha deducido ya que a Ida se le daba bien correr y saltar en los árboles de su selva natal, que creció relativamente rápido, que se alimentaba de hojas y frutas y que quizá tuviera hábitos nocturnos.

Un análisis más profundo del fósil revelará, sin duda, aún más información sobre la vida y la época de este antiguo primate. Quizá también permita aclarar su posición en el árbol genealógico.

Kate Wong

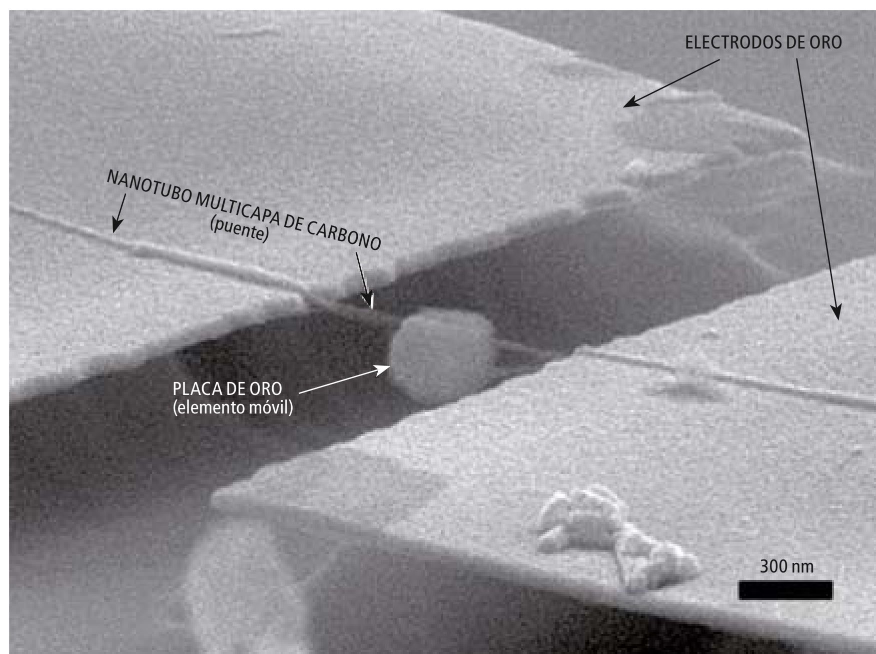
Nanomotores térmicos

El efecto termoforético permite controlar el movimiento de nanoobjetos

De igual manera que la nanociencia persigue entender y caracterizar los principios básicos por los que se rige la materia a escala nanoscópica, el fin último de la nanotecnología es emplear dicho conocimiento para manipular y controlar la materia en esa escala y sacar partido de ello. Las novelas de fantasía científica describen un futuro en el que las nanomáquinas desempeñarán múltiples funciones: transporte de fármacos a través del cuerpo humano, extracción de energía a partir de enlaces químicos, construcción de circuitos electrónicos nanoscópicos, destrucción de moléculas tóxicas en agua y otras aplicaciones menos pacíficas. Aunque no descartamos que algunas de esas visiones lleguen algún día a convertirse en realidad, lo cierto es que permanecen todavía muy alejadas de lo que podemos conseguir en los laboratorios de investigación. Estamos dando tan sólo los primeros pasos en el nanomundo.

Para explotar la nanoescala desde un punto de vista técnico, será necesario usar nanomáquinas o nanomotores. La naturaleza constituye una estupenda fuente de inspiración en ese sentido: cuanto más aprendemos sobre los sistemas biológicos, más nos damos cuenta de cuáles son las posibilidades de la nanotecnología. La naturaleza ha hecho gala de un ingenio asombroso a la hora de producir nanomáquinas como la ATP sintasa (motor rotacional involucrado en la síntesis del ATP, la moneda energética de la célula) o la quinesina (motor proteínico con capacidad de desplazarse a lo largo de los microtúbulos celulares y realizar funciones de transporte; obtiene la energía del ATP generado por la sintasa).

Existen dos estrategias en el desarrollo de nanomotores. La primera consiste en emplear los nanomotores que nos brinda la naturaleza, quizá con modificaciones apropiadas para realizar las tareas que les asignemos; numerosos grupos de investigación en distintos países trabajan ya en esta línea. Una segunda estrategia requiere la fabricación de nanomotores artificiales. Por botón de muestra, el motor basado en nanotubos de carbono obtenido por el grupo de Alex Zettl, de la Universidad de California en Berkeley. También los nanomotores catalíticos: pequeñas partí-



En este nanomotor térmico, un nanotubo multicapa de carbono tiende un puente entre dos electrodos de oro. El elemento móvil, una plaquita de oro, se halla pegado al nanotubo, suspendido entre los electrodos. Cuando a través del nanotubo circula una corriente eléctrica de cierta intensidad, la plaquita de oro se desliza a lo largo del puente hacia el electrodo más cercano.

culas catalizadoras asimétricas que, en virtud de su asimetría, se mueven en la dirección en la que decrece la concentración del producto de la reacción química que catalizan. Otra vía para controlar el movimiento de nanoobjetos se funda en el empleo de campos externos, como un campo magnético, para dirigir la difusión de imanes moleculares [*véase* "Propulsión y conducción de nanorrobots", por Thomas E. Mallouk y Ayusman Sen; Investigación y Ciencia, julio de 2009].

Termoforesis

Todos esos prototipos de nanomotores artificiales se hallan, de una forma u otra, condicionados por nuestra visión macroscópica del mundo. Sin embargo, debemos recordar que las cosas son muy distintas a escala nanoscópica. Efectos que resultan pequeños o incluso despreciables a nuestra escala adquieren importancia capital a escala de nanómetro y, tenidos adecuadamente en cuenta, podrían ofrecer nuevas oportunidades para el desarrollo de nanomotores.

Uno de esos efectos es el movimiento termoforético, es decir, la tendencia que muestran las moléculas en un gas o líquido, o los portadores de carga en un conductor, a moverse de caliente a frío en un gradiente de temperatura. Hemos demostrado que este efecto resulta potencialmente útil en dispositivos nanoscópicos. En nuestro trabajo se empleó el calor que genera un nanotubo de carbono cuando circula por él una corriente eléctrica para inducir la formación de un gradiente térmico a lo largo del tubo. El gradiente térmico indujo el movimiento de un pequeño tubo concéntrico al anterior, en la dirección de mayor a menor temperatura.

Aunque se trata sólo de un prototipo, este nanomotor ofrece una prueba de que, en el diseño de dispositivos nanoscópicos, no sólo debemos tener en cuenta modelos y conceptos macroscópicos, sino que hemos de contar con la posibilidad de emplear efectos nuevos, ausentes a escala macroscópica, pero importantes a escala del nanómetro.

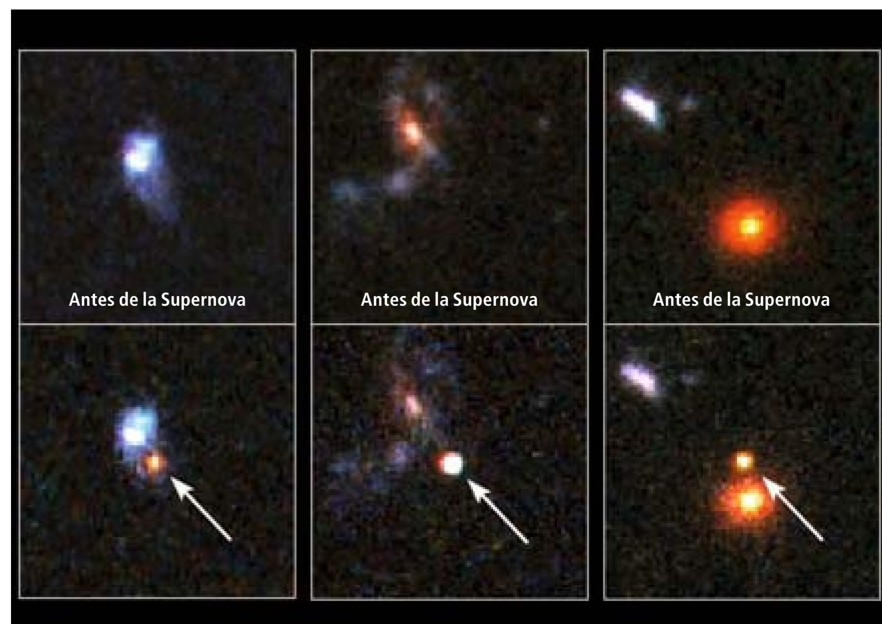
Eduardo R. Hernández y Riccardo Rurali
Instituto de Ciencia de Materiales de Barcelona
Amelia Barreiro y Adrian Bachtold
Centro de Investigación en Nanociencia y Nanotecnología (CSIC)

El problema de la coincidencia cósmica

Se exponen el problema de la coincidencia cósmica y diversas vías de solución posibles

A comienzos de los años noventa, la expansión del universo a gran escala solía describirse dominada por una materia carente de presión (polvo) y —en muy pequeña medida— por la radiación (fotones y neutrinos). Como consecuencia, las ecuaciones de la relatividad general de Einstein predecían un universo en expansión desacelerada: los cúmulos de galaxias seguirían alejándose unos de otros, con una lentitud creciente.

Un par de años antes del cambio de milenio, mediciones del brillo de supernovas lejanas, producido por la explosión de estrellas enanas blancas, vinieron a desautorizar esa visión. El brillo era menor del esperado. Esto indicaba que nuestra distancia a las supernovas era mayor de lo previsto y actualmente, por tanto, la expansión es, en realidad, una expansión acelerada.



Del brillo de explosiones de supernova como estas, ocurridas hace miles de millones de años, se deduce que la expansión del universo se está acelerando y que posiblemente exista en el universo una "energía oscura".

NASA Y A. RIESS (STScI)

Mediciones posteriores, tanto de supernovas como de otros indicadores (el espectro de radiación de fondo de microondas, la abundancia de gas en cúmulos de galaxias, etc.), han venido a reafirmar esa conclusión. Adviértase que sólo "recientemente" el universo entró en fase acelerada. Para que las galaxias hayan logrado formarse, ha debido pasar con anterioridad por una época muy larga de desaceleración.

Según la relatividad general, para producir la aceleración observada es necesaria la existencia de una componente de energía (distinta de la materia polvo y la radiación) de presión altamente negativa, componente a la que se ha bautizado como "energía oscura". Su otra característica, además de dicha presión, es la de no formar estructuras a escalas menores que el tamaño del universo observado. Aparte de ello, nada más se sabe sobre su naturaleza.

El candidato más obvio a energía oscura es la constante cosmológica, enten-

dida como energía del vacío cuántico. Según la teoría cuántica de campos (TQC), dicho vacío posee una densidad de energía no nula, a la que contribuye cada fuente de energía existente en la naturaleza. Sin embargo, esta solución —a primera vista la más "sencilla" de todas— presenta dos dificultades.

De una parte, la densidad de energía predicha por la TQC habría de ser muchos ordenes de magnitud superior al valor observado (del orden de la de la materia polvo). Si la constante cosmológica tuviese ese valor, el universo se habría expandido a un ritmo tal, que las galaxias no habrían llegado a existir. De otra parte, mientras que la densidad de energía de la materia polvo decrece rápidamente con la expansión del universo (como el inverso de su "volumen"), la densidad de energía del vacío permanece constante. Dado que actualmente son comparables, cabe preguntarse: ¿Por qué ambas densidades de energía son del mismo orden precisamente hoy? Este es el problema de la coincidencia.

Su solución se busca por diversas vías. A continuación mencionaremos brevemente varias, no sin advertir que, si bien todas presentan aspectos esperanzadores, ninguna de ellas resulta —al menos de momento— convincente.

Los proponentes de la constante cosmológica sostienen que finalmente la TQC encontrará una explicación al pequeño valor de la constante cosmológica, quizás una rotura parcial de simetría. El "ajuste fino" (el "por qué hoy") podría explicarse recurriendo al principio antrópico: sólo podemos observar valores de la constante cosmológica compatibles con la existencia de vida inteligente. Lamentablemente, aparte de otras dificultades, esto es como explicar la composición de la atmósfera terrestre con el argumento de que si ésta fuese distinta, no podríamos respirar. Sin embargo, los modelos basados en la constante cosmológica muestran un alto grado de compatibilidad con las medidas observacionales (espectro de radiación del fondo de microondas, de la materia, oscilaciones acústicas de bariones, etc.), lo cual no deja de ser paradójico.

Dadas las enormes dificultades anejas a la constante cosmológica, muchos estudiosos han optado por recurrir a una energía oscura dinámica, preferentemente representada por un campo escalar con energía potencial mucho mayor que la de movimiento y sujeta a la condición de evolucionar muy lentamente. (Un tipo de campo que generaliza la idea de magnitud escalar. El campo asociado a la partícula de Higgs, por ejemplo, es un campo escalar. No lo son, en cambio, el electromagnético o la gravedad.) Se suele denominar a ese campo "quintaesencia" si el valor absoluto de su presión es inferior al de su densidad; "campo fantasma", si es superior. La ventaja inherente al campo escalar es que su densidad de energía varía con la expansión y, en principio, ésta podría ser hoy del orden del de la materia polvo. Este tipo de modelos ajusta muy bien los datos observacionales, especialmente los de campos fantasma. Pero al igual que la constante cosmológica, no están exentos de "ajuste fino", ya sea en el valor inicial del campo o en los parámetros que figuran en su expresión matemática.

Una posibilidad que últimamente está recibiendo bastante atención es que la materia polvo y la energía oscura interaccionen entre sí de forma que ésta, en

el transcurso de la expansión, se vaya convirtiendo lentamente en aquélla. En ese caso, el cociente entre sus energías tendería a una constante o, al menos, a variar más lentamente. Ello aliviaría el problema de la coincidencia, pero ya que se desconoce la naturaleza de la energía oscura, no puede garantizarse que las interacciones propuestas posean una base física real. Además, el problema sólo se resolverá si se demuestra que dicha constante es del orden de la unidad.

Si la expansión acelerada se pudiera explicar sin necesidad de la energía oscura, el problema de la coincidencia desaparecería. Ahora bien, prescindir de la energía oscura supone —en este contexto— alterar, o incluso renunciar, a la teoría de gravitación de Einstein. Esta vía, es ciertamente atrevida, pero se está explorando. No parece nada fácil modificar una teoría que —hasta donde se ha podido verificar— funciona muy bien, para obtener otra que funcione al menos tan bien como la anterior y además prediga una expansión desacelerada del universo en sus primeras etapas y otra acelerada después. Sin embargo, el hecho de que tras aproximadamente diez años de investigación la energía oscura continúe siendo un enigma, puede ser indicio de que la teoría de Einstein no es la más adecuada para dar razón del universo presente y su futura evolución.

En definitiva, el problema de la coincidencia es hoy uno de los misterios más sobresalientes de la cosmología. Si finalmente se descubre que la coincidencia es sólo eso, una coincidencia, entonces habrá dejado de ser un problema.

Diego Pavón
Departamento de Física, Universidad Autónoma de Barcelona

Energía y medio ambiente

Salvar la Tierra mediante incentivos económicos podría lesionar los derechos de los indígenas

Al mismo tiempo que la civilización industrial llega hasta el último rincón del planeta para extraer petróleo, madera o pescado, los ecologistas intentan mitigar sus perniciosos efectos sobre la biosfera. Algunos proyectos encaminados a reducir la contaminación, prevenir el cambio climático y proteger la biodiversidad son objeto de crítica, sin embargo, porque podrían destruir la forma de ganarse la vida de algunos pueblos indígenas, que se verían entonces obligados a abandonar sus tierras y destruir sus recursos.

Los conservacionistas se toparon a menudo con los moradores de zonas silvestres. Durante la última mitad del siglo XX, millones de personas pertenecientes a pueblos indígenas de Africa, Sudamérica y Asia fueron expulsados de las tierras de sus antepasados para que se creasen santuarios naturales donde no vivieran seres humanos. La mayoría pereció, víctima de la malnutrición, las enfermedades y la explotación, explica Michael Cernea, de la Universidad George Washington. Semejantes consecuencias, unidas al conocimiento de que los grupos indígenas suelen ayudar a que los ecosistemas se mantengan estables, por ejemplo mediante el control de los incendios o de malas hierbas invasoras, han convencido a los principales grupos conservacionistas de la necesidad de tener en cuenta a los habitantes de los lugares que quieren proteger.

El Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF) describe ahora a los indígenas como "aliados naturales" y Nature Conservancy se compromete a buscar su consentimiento "previo, libre e informado" para los proyectos que afecten a sus territorios.

Ciertos incidentes recientes, sin embargo, han hecho que algunos observadores se planteen preguntas. "Hablan mucho, pero ¿cumplen lo que predican?", dice Jim Wickens, del grupo Programa de los Pueblos de la Selva, con sede en Moreton-in-Marsh, Inglaterra. Wickens cita el "enorme grito de inquietud" de setenta y un grupos de base que protestan contra un intento del WWF de desarrollar un plan de certificación de la acuicultura de gambas. Se han creado muchas granjas de gambas a lo largo de las costas tropicales, talando los manglares, y sus residuos a veces perjudican a las pesquerías y tierras agrícolas de los alrededores. El Proyecto de Acción del Manglar, una asociación con sede en Port Angeles, Washington, considera que es imposible conseguir que la acuicultura de la gamba sea sostenible.

WWF, por su parte, afirma que ni una tercera parte de los acuicultores de gambas de todo el mundo cumplen las pautas que espera imponer. Por lo tanto, afirma Jason Clay, vicepresidente de mercados del WWF, la certificación haría "que la acuicultura de la gamba fuera más limpia". Peter Vandergeest, de la Universidad de York en Toronto, señala con preocupación que la iniciativa no tendrá éxito a no ser que las comunidades afectadas por las granjas de gambas sean escuchadas en lo que se refiere al establecimiento de pautas y la forma de hacer que se cumplan. Debido a la situación remota de muchas granjas de gambas, explica, las inspeccio-



Tribus amenazadas: los melayu de Indonesia podrían perder sus territorios de caza y pesca por culpa de un plan de emisiones de carbono, pensado para conservar los bosques.

CORTESIA DE FOREST PEOPLES PROGRAM

nes serán muy poco frecuentes y, cuando se hagan, “no costará organizar un teatro”.

Los defensores de los pueblos indígenas encuentran aún más preocupantes los sistemas compensatorios de emisiones de carbono, que intentan proteger los bosques existentes. Varias de las grandes organizaciones ecologistas consideran que el dióxido de carbono que no se emite cuando se evita una deforestación podría venderse en forma de derechos de emisión, lo que generaría fondos para la conservación y para las poblaciones locales.

El próximo diciembre podría incluirse un plan REDD (acrónimo de “reducción de emisiones de la deforestación y degradación”) en la Convención sobre el Cambio Climático de las Naciones Unidas; el plan se costearía en parte con la venta de derechos de emisión de carbono. Nature Conservancy confía en que se puedan generar derechos de emisión de tres mil millones de toneladas, valorados en cuarenta y cinco mil millones de dólares, hasta el año 2020.

Sin embargo, Marcus Colchester, del Programa de los Pueblos de la Selva, señala: “Vemos el riesgo de que la perspectiva de conseguir mucho dinero con la biodiversidad haga que se olviden los intereses de los indígenas”. En particular, el aumento del valor económico de los bosques podría conducir al “mayor pillaje de tierras de la historia”, según Tom B. K. Goldtooth, de la Red Medioambiental Indígena, en Bemidji, Minnesota.

La Interpol ha advertido sobre las intenciones de entidades sin escrúpulos que planean beneficiarse de REDD: podrían llegar a expulsar a pueblos indígenas de sus bosques para hacerse con los correspondientes títulos de propiedad. Nature Conservancy, que apoya los esfuerzos de los pueblos autóctonos por adquirir derechos legales de propiedad sobre sus territorios, responde que “aumentar el valor de los bosques mediante REDD sólo puede reportarles beneficios”.

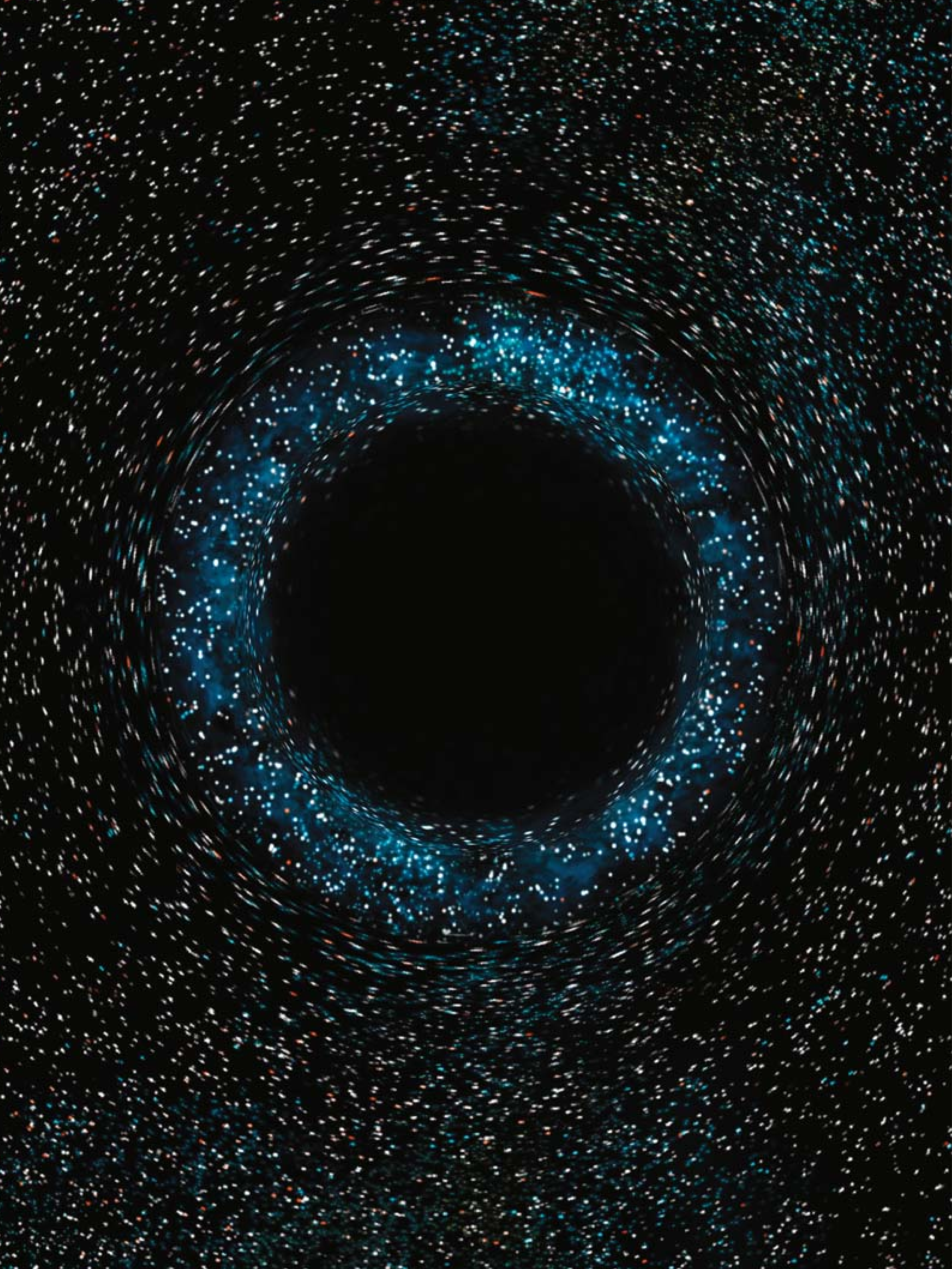
La inquietud por un posible desplazamiento de los pueblos indígenas resulta especialmente intensa en Indonesia, donde ha habido ataques violentos contra gentes de las aldeas que se oponen a que, en su territorio, se talen árboles y se hagan plantaciones destinadas a la pasta de papel y al aceite de palma. Actualmente, se están desarrollando ya en aquel país unos veinte proyectos de silvicultura para la fijación del carbono. Colchester advierte de que la normativa gubernamental con respecto a REDD no protege de forma adecuada a las poblaciones autóctonas. En la península de Kampar, por ejemplo, una empresa maderera propone desbrozar un anillo de selva pantanosa y plantarlo con acacias, para proteger el bosque del interior del anillo y así obtener derechos REDD. El proyecto limitaría el acceso de los melayu a sus territorios de caza y a los arroyos donde pescan. Como señal de protesta, han impedido que el personal de la empresa entre en esa área.

Los intentos de proteger los arrecifes de coral despiertan también el temor a una posible expulsión de las poblaciones indígenas. En mayo, seis países del sudeste asiático, con respaldo técnico de Nature Conservancy, WWF y Conservation International, se comprometieron a participar en la Iniciativa del Triángulo Coralino, que protegerá 75.000 kilómetros cuadrados de costa, arrecifes de coral y océano. M. Riza Damanik, de KIARA, la Coalición por la Justicia Pesquera de Indonesia, teme que las zonas de pesca más ricas queden acotadas como áreas protegidas.

Lea Scherl, de la Universidad James Cook, en Australia, que ha estudiado las zonas marinas protegidas de la región, opina que dichos temores están justificados. En las mayores organizaciones medioambientales, explica, los científicos piensan en los efectos a gran escala de los proyectos, como si el mapa no contuviese nada más que naturaleza, y sólo se ocupan de los factores culturales en segunda instancia. “No se suele prestar verdadera atención a los habitantes desde el primer momento”, sostiene. Además, los esfuerzos por mitigar el impacto de un proyecto sobre las comunidades locales adolecen de falta de financiación y de un carácter poco sistemático, en comparación con la manera en que se abordan los aspectos científicos.

El punto de vista de quienes tienen un conocimiento detallado de la tierra y los mares, acumulado generación tras generación, es esencial para la conservación de la naturaleza. Como afirma Scherl: “Perdemos esa sabiduría cuando echamos a las personas”.

Madhusree Mukerjee



ESTRELLAS NEGRAS

Los efectos cuánticos podrían impedir la formación de agujeros negros genuinos. En su lugar se crearían unos cuerpos muy densos, las estrellas negras

CARLOS BARCELO, STEFANO LIBERATI, SEBASTIANO SONEGO Y MATT VISSER

Los agujeros negros excitan la imaginación: albergan un misterio inconmensurable detrás de la cortina de su "horizonte de sucesos", no permiten la salida de nada que entre en ellos e irremisiblemente aniquilan lo que ingieren.

Para los físicos teóricos, los agujeros negros son un tipo de solución de las ecuaciones de campo de Einstein en que se funda la teoría general de la relatividad. Esta determina, por una parte, la manera en que la materia y la energía distorsionan el espaciotiempo como si fuera elástico y, por otra, cómo esa curvatura que adquiere el espaciotiempo controla el movimiento de la materia y la energía, es decir, cómo equivale a la fuerza que llamamos gravedad. Las ecuaciones predicen sin ambigüedades la existencia de regiones del espaciotiempo de las que no puede partir ninguna señal que llegue hasta los observadores lejanos. Estas regiones —los agujeros negros— comprenden lugares ("singularidades") donde la densidad de la materia se aproxima al infinito y una zona vacía de extrema gravedad que los rodea de la que nada, ni siquiera la luz, puede escapar. Un límite conceptual, el horizonte de sucesos, separa la zona de intensa gravedad del resto del espaciotiempo. En el caso más sencillo, el horizonte de sucesos es una esfera de unos 6 kilómetros de diámetro que delimita un agujero negro con la masa del Sol.

Hasta aquí la teoría. ¿Y qué hay de la realidad? Muchas observaciones astrofísicas de alta calidad revelan que el universo contiene cuerpos sumamente compactos desprovistos de luz o de cualquier radiación propia. Aunque estos objetos oscuros tienen una masa de entre unos pocos soles y más de un millón de soles, su tamaño, en la medida en que cabe determinarlo, va de unos kilómetros a millones de kilómetros, de acuerdo con las predicciones que la relatividad general hace según la masa que tengan.

Aun así, ¿son esos cuerpos oscuros y compactos observados por los astrónomos los agujeros negros predichos por la relatividad general? Los datos observacionales de hoy se ajustan muy bien a la teoría, pero el modo en que la teoría misma describe los agujeros negros resulta insatisfactorio. En concreto, la predicción de que una singularidad reside en el interior de todo agujero negro indica que la teoría falla en ese punto, como suele ocurrir siempre que una teoría predice que una cantidad se torna infinita. Presumiblemente, la teoría yerra por no considerar los efectos cuánticos que tanto la materia como la energía exhiben a escalas microscópicas. La búsqueda de una teoría modificada que incluya la mecánica cuántica, con frecuencia denominada gravedad cuántica, ha promovido una intensa actividad en la física teórica.

La necesidad de una teoría cuántica de la gravedad conduce a preguntas fascinantes: ¿Cómo serían los agujeros negros corregidos por la mecánica cuántica? ¿Totalmente diferentes de los agujeros negros clásicos? ¿O acaso la descripción clásica es una buena aproximación? Los cuatro autores de este artículo hemos demostrado que ciertos efectos cuánticos podrían quizás impedir la formación de los agujeros negros. En su lugar

AGENCIA ESPACIAL EUROPEA, NASA Y FELIX MIRABEL
Comisión de Energía Atómica Francesa, Instituto de Astronomía y Física Espacial/Conicet, Argentina

CONCEPTOS BASICOS

- Los agujeros negros son estructuras teóricas del espaciotiempo predichas por la teoría de la relatividad general. Nada puede escapar a la gravedad de un agujero negro, una vez atravesado su horizonte de sucesos.
- Una aproximación cuántica predice que los agujeros negros se evaporan lentamente, aunque de una forma paradójica. Los físicos buscan una teoría cuántica completa y consistente de la gravedad que describa a los agujeros negros.
- En contra de lo que suele aceptarse, un efecto cuántico llamado polarización del vacío podría adquirir una magnitud suficiente para impedir la formación de un agujero y propiciar la de una "estrella negra" en su lugar.

¿QUE ES UN AGUJERO NEGRO?

Un agujero negro es una región de espaciotiempo curvo con una gravedad tan intensa que nada puede escapar de él. Su propiedad más característica es el horizonte de sucesos: la frontera de la región sin escape. Un agujero negro está prácticamente vacío: su masa parece haberse derrumbado sobre un punto de densidad infinita —una "singularidad"— en las entrañas del agujero.

Un agujero negro con una masa tres veces superior a la solar tendría un diámetro de unos 18 kilómetros.

18 kilómetros

Horizonte de sucesos

Singularidad

Onda de luz un segundo después

Destello

Lejos de una región de gran masa, un destello de luz se expandiría simétricamente en todas las direcciones (1).

Justo por fuera del horizonte de sucesos de un agujero negro, la gravedad captura la mayor parte del destello (2).

Se escapa algo de luz (3).

Si el destello ocurriera en cualquier lugar dentro del horizonte de sucesos, toda la luz sería atraída por la singularidad del agujero negro (4).

En la práctica, se pueden detectar los agujeros negros gracias al material que los circunda y cae hacia ellos. La imagen de la derecha, tomada en 1998 con el Telescopio Espacial Hubble, muestra un enorme disco de gas y polvo del que se cree que alberga un agujero negro supermasivo central. Sin embargo, estas observaciones sólo informan de la presencia de un objeto muy compacto y pesado que apenas emite luz propia (o no la emite en absoluto); los datos no demuestran, estrictamente, que el objeto sea un agujero negro.



aparecería una nueva clase de objeto, a la que hemos bautizado con el nombre de estrella negra. Una estrella negra encontraría cerrado el camino hacia una densidad infinita; tampoco estaría envuelta por un horizonte de sucesos. A una estrella negra la mantendría algo que no suele considerarse un material de construcción resistente: el propio espacio.

El peso de la nada cuántica

Llegamos a nuestras conclusiones gracias a una aproximación venerable, la gravedad semiclásica, pero la aplicamos sin los mismos supuestos de la materia colapsante de las que otros habían partido antes; queríamos ver si de ese modo nos librábamos de pisar el terreno paradójico en que los demás habían entrado.

En ausencia de una teoría plenamente desarrollada de la gravedad cuántica, durante los últimos 30 años se ha recurrido a la gravedad semiclásica para analizar el efecto de la mecánica cuántica sobre los agujeros negros. Este método incorpora aspectos de la física cuántica —en concreto, la teoría cuántica de campos— a la gravedad clásica de Einstein.

La teoría cuántica de campos describe cada una de las partículas fundamentales —el electrón, el fotón y los quarks, entre otras— en forma de un campo que llena el espacio tal y como lo llena el campo electromagnético. Las ecuaciones de la teoría cuántica se enuncian por lo general en un espaciotiempo plano, es decir, en ausencia de gravedad. La gravedad semiclásica utiliza la teoría cuántica de campos formulada en un espaciotiempo curvo.

En líneas generales, la estrategia de la gravedad semiclásica es la siguiente: la materia agrupada en alguna configuración particular produciría, de acuerdo con la teoría clásica de la relatividad general, un espaciotiempo curvo determinado. Sin embargo, la curvatura del espaciotiempo modifica la energía de los campos cuánticos. Esta energía modificada cambia, conforme a la relatividad general clásica, la curvatura del espaciotiempo. Y así continuamente, iteración tras iteración.

El objetivo es obtener una solución coherente: un espaciotiempo curvo con una configuración de campos cuánticos cuyas energías generen esa misma curvatura. Esa clase de soluciones debería proporcionar una buena aproximación de la realidad en muchas situaciones en que intervengan los efectos cuánticos y la gravedad, aun cuando la gravedad misma no haya sido descrita por la teoría cuántica. Por tanto, la gravedad semiclásica incorpora las correcciones cuánticas "mínimas" a la relatividad general (tiene en cuenta el comportamiento cuántico de la materia, pero trata la gravedad, es decir, la curvatura del espaciotiempo, a la manera clásica).

Esta aproximación tropieza, sin embargo, con un embarazoso problema: el cálculo directo de la menor energía posible de los campos cuánticos (o "punto cero", la energía cuando no hay partículas de ninguna clase, la energía del vacío) produce un resultado infinito. Este mismo problema ya aparece en la teoría cuántica de campos común (es decir, en un espacio plano sin gravedad). Afortunadamente para los teóricos que desean predecir los fenómenos físicos que no tienen gravedad, las partículas se comportan de un modo que depende sólo de las diferencias de energía entre los distintos estados en que puedan encontrarse, por lo

LUCY READING-IKKANDA (*ilustración*); NASA, ROELAND P. VAN DER MAREL *Space Telescope Institute* Y FRANK C. VAN DEN BOSCH *Universidad de Washington* (*disco de polvo alrededor del agujero negro*)

que el valor de la energía cuántica del vacío no desempeña ningún papel. Gracias a una sustracción cuidadosa, la "renormalización", las diferencias de energía se computan con una precisión extrema.

Con la gravedad en escena, sin embargo, la energía de vacío importa. Una densidad infinita de energía parece que debería producir una gigantesca curvatura del espaciotiempo; esto es, incluso un espacio "vacío" tendría una intensa fuerza gravitatoria que no sería ni remotamente compatible con el universo que observamos hoy día. Las observaciones astronómicas de los últimos diez años indican que la contribución neta del punto cero a la densidad total de energía es muy pequeña. La gravedad semiclásica no pretende resolver este problema. En vez de intentar dar con una solución, se prefiere pensar que, sea la que sea, anulará la contribución del punto cero a la densidad de energía del espaciotiempo plano. Tal suposición crea un vacío semiclásico coherente: la densidad de energía es cero allí donde la relatividad general predice un espaciotiempo plano.

Si hay materia presente, el espaciotiempo es curvo, lo que altera la densidad de energía del punto cero de los campos cuánticos, de modo que la energía del punto cero no se anula con toda exactitud. Se dice que el remanente está causado por la polarización del vacío, en analogía con el efecto de una carga eléctrica que polariza el medio (*véase el recuadro* "Lo que el vacío puede hacer").

Hemos descrito las propiedades de la gravedad semiclásica en términos de masa y densidad de energía, pero en la relatividad general no son sólo esas magnitudes las que producen la curvatura del espaciotiempo. La densidad de momento y las presiones y tensiones asociadas a una sustancia gravitante específica también contribuyen. Con un solo objeto fisicomatemático, el tensor de energía y tensiones (TET), se describen todas las magnitudes productoras de curvatura. La gravedad semiclásica presupone que en un espaciotiempo plano las contribuciones de punto cero de los campos cuánticos al TET total se anulan. El objeto fisicomatemático obtenido tras aplicar al TET tal sustracción se denomina tensor renormalizado de energía y tensiones (TRET).

Cuando se aplica al espaciotiempo curvo, la sustracción tiene éxito en la anulación de la parte divergente del TET, pero deja en el TRET un valor finito no nulo. El resultado final es un proceso iterativo: la materia clásica curva el espaciotiempo mediante las ecuaciones de Einstein en una cantidad fijada por el TET clásico de la materia. Esa curvatura hace que el vacío cuántico adquiera un TRET finito no nulo. Este TRET del vacío se convierte en una fuente adicional de gravedad, que modifica la curvatura. La nueva curvatura induce un TRET de vacío diferente, y así sucesivamente.

CATEGORIAS DE AGUJEROS NEGROS

Según la relatividad general, un agujero negro queda perfectamente definido por tres magnitudes: masa, momento angular y carga eléctrica. No existe ninguna diferencia por lo que haya dentro del agujero: materia, antimateria o energía, o una combinación de las tres.

Los astrónomos han observado agujeros negros con tres clases de masa. Los agujeros con masas entre 5 y 15 veces la solar proceden de estrellas moribundas. Muchas galaxias albergan un agujero de millones o miles de millones de masas solares en su núcleo. Se han detectado agujeros con miles de masas solares en el centro de los cúmulos globulares estelares.

LA PARADOJA DE LOS AGUJEROS NEGROS CUANTICOS

Las ecuaciones clásicas (es decir, no cuánticas) de la relatividad general prohíben que emerja algo del horizonte de sucesos de un agujero negro. Sin embargo, Stephen W. Hawking realizó cálculos cuánticos en la década de los setenta que predicen la lenta emisión por parte de los agujeros negros de partículas de un modo aleatorio (*izquierda*). La aleatoriedad crea una situación paradójica (*derecha*): el "problema de la información".

SE EMITE RADIACION HAWKING

Incluso en el espacio vacío, los procesos cuánticos producen constantemente parejas de partículas virtuales y sus antipartículas, que se aniquilan entre sí.



Cerca del horizonte de sucesos de un agujero negro, una partícula virtual podría ser capturada por el agujero y una segunda podría escapar. La partícula escapada transporta masa positiva y la capturada lleva masa negativa dentro del agujero, reduciéndose por tanto la masa del agujero.

Si nada cae dentro del agujero, la masa y el horizonte de sucesos merman gradualmente. Este proceso de evaporación se acelera cuanto más pequeño se hace el agujero.

Partícula escapada
Horizonte de sucesos
Partícula capturada
El horizonte de sucesos se encoge

SE PIERDE INFORMACION

La materia que cae dentro de un agujero negro transporta una gran cantidad de información.

El descubrimiento de Hawking indica que un agujero negro se puede evaporar hasta quedarse sin masa, pero las partículas aleatorias emitidas no transportan información. La aparente pérdida de información viola la propiedad fundamental de la mecánica cuántica llamada unitariedad. Esta contradicción ha de resolverse.

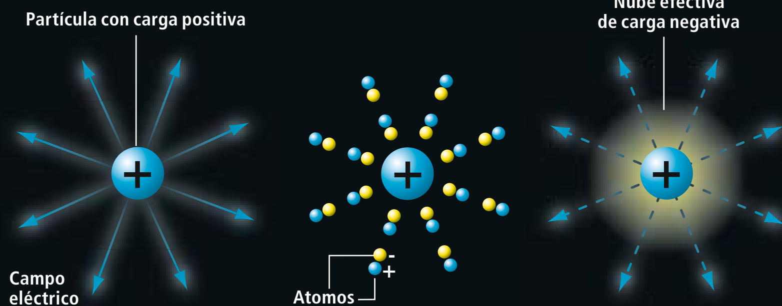
LUCY READING-IKKANDA

LO QUE EL VACIO PUEDE HACER

En la relatividad general clásica, el espaciotiempo es dinámico y su curvatura produce la gravedad. Un efecto cuántico llamado polarización del vacío proporciona otro mecanismo por el que el espacio vacío podría desempeñar una función activa en el universo.

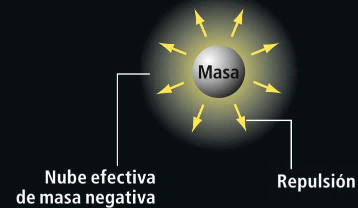
ANALOGIA ELECTRICA

En un medio, el campo eléctrico de un objeto cargado (*izquierda*) polariza los átomos cercanos (*centro*) y reduce con ello el campo eléctrico total (*derecha*). La teoría cuántica de campos revela que incluso el vacío puede polarizarse, ya que el campo eléctrico polariza los pares de partículas virtuales y sus antipartículas.



POLARIZACION DEL VACIO

En la relatividad general, el papel de la carga eléctrica lo adoptan la masa y la energía, y el papel del campo eléctrico, el espaciotiempo curvo o gravedad. La polarización del vacío produce un déficit energético (una nube de energía negativa) y una fuerza repulsiva.



Los agujeros negros corregidos cuánticamente

Descrita la aproximación de la gravedad semiclásica, la pregunta es: ¿qué efecto tienen las correcciones cuánticas sobre las predicciones relativas a los agujeros negros? En particular, ¿cómo se modifica el proceso de formación de un agujero negro?

El agujero negro más sencillo de una masa determinada (digamos M veces la masa del Sol) es aquel que no rota y no tiene carga eléctrica. Un agujero así tiene un radio R igual a $3M$ kilómetros. Se denomina a R "radio gravitatorio" o "radio de Schwarzschild" para esa masa concreta. Si por alguna razón parte de la materia colapsa para ocupar una región inferior al radio gravitatorio, se forma un agujero negro; desaparece dentro de su propio horizonte de sucesos.

El Sol, por ejemplo, tiene un radio de 700.000 kilómetros, mucho mayor que su radio gravitatorio (3 kilómetros). Las ecuaciones pertinentes de la gravedad semiclásica manifiestan claramente que el TRET del vacío cuántico es despreciable en esta situación. Por tanto, el Sol está muy lejos de formar un agujero negro de acuerdo con las ecuaciones clásicas; las correcciones cuánticas no modifican tal conclusión. Sin duda, los astrofísicos pueden ignorar los efectos de la gravedad cuántica en su estudio del Sol y de la mayoría de los otros objetos astronómicos.

Las correcciones cuánticas son importantes, pese a todo, si una estrella no es mucho mayor que su radio gravitatorio. En 1976 David G. Boulware, ahora en la Universidad de Washington, analizó el caso de una estrella compacta estacionaria (es decir, fuera de la fase de colapso). Probó que cuanto más cerca estuviera la estrella de su radio gravitatorio, mayor sería el TRET del vacío cerca de la superficie; iría aumentando con la cercanía hasta una densidad energética infinita. Este resultado implica que la teoría de la gravedad semiclásica no tolera, como solución de las ecuaciones, la existencia de agujeros negros estacionarios (en los que el horizonte de sucesos permanece con un tamaño constante).

El resultado de Boulware, no obstante, no nos dice qué hay que esperar en el caso de una estrella en colapso, la cual, según la relatividad general clásica, derivaría en un agujero negro. Stephen W. Hawking ya había atacado este problema un año antes empleando técnicas algo diferentes, y demostró que un agujero negro clásico formado por colapso emite partículas aleatorias. Más precisamente, las partículas presentan una distribución de energías propia de la radiación térmica: el agujero negro tiene una temperatura. Conjeturó que los agujeros negros corregidos con la mecánica cuántica serían esencialmente agujeros negros clásicos sujetos a una lenta evaporación por medio de esa radiación. Un agujero negro de una masa solar tiene una temperatura de 60 nanokelvin. El ritmo de evaporación sería tan lento, que el agujero absorbería mucha más radiación del fondo cósmico que la que emitiría; por tanto, su tamaño crecería. En la práctica, un agujero negro de esa masa en fase de evaporación no se distinguiría de un agujero negro clásico: la evaporación sería inmensurablemente pequeña.

El enorme esfuerzo realizado por los teóricos en el decenio posterior al trabajo de Hawking, incluido el cálculo de aproximación

Los autores

Carlos Barceló, **Stefano Liberati**, **Sebastiano Sonego** y **Matt Visser** han colaborado en combinaciones y permutaciones varias desde principios del nuevo milenio. Barceló es profesor de física teórica y vicedirector del Instituto de Astrofísica de Andalucía. Liberati es profesor adjunto de astrofísica de la Escuela Internacional de Estudios Avanzados de Trieste. Sonego enseña física matemática en la Universidad de Udine. Visser es profesor de matemáticas de la Universidad Victoria de Wellington, en Nueva Zelanda.

LUCY READING-IKKANDA

del TRET en las configuraciones de colapso, reforzaron la idea de que las cosas serían realmente así. Hoy día, los físicos tienden a creer que los agujeros negros se forman tal y como describe la teoría clásica de la relatividad general y posteriormente experimentan una lenta evaporación cuántica a causa de la radiación de Hawking.

El problema de la información

El descubrimiento de Hawking de la evaporación de los agujeros negros, unido a los resultados anteriores de Jacob D. Bekenstein, de la Universidad Hebrea de Jerusalén, desveló una profunda relación —aunque no bien comprendida— entre la gravedad, la física cuántica y la termodinámica. Al mismo tiempo, abrió problemas nuevos. Quizás el más importante es el llamado problema de la información, íntimamente relacionado con la cuestión de cuál es el resultado final de la evaporación de un agujero negro.

Tómese como ejemplo una gran estrella en fase de colapso gravitatorio. La estrella alberga una vasta cantidad de información, consistente en las posiciones, velocidades y otras propiedades de sus más de 10^{55} partículas. Supóngase que la estrella forma un agujero negro que a lo largo de los eones se evapora emitiendo radiación Hawking. La temperatura de un agujero negro es inversamente proporcional a su masa; por tanto, un agujero negro en evaporación se vuelve más caliente y se evapora más rápidamente a medida que la masa y el tamaño disminuyen. Una explosión gigantesca expulsa lo que queda de la masa del agujero. Pero, ¿qué es lo que permanece? ¿Desaparece por completo el agujero o queda algún tipo de remanente? En cualquier caso, ¿qué es lo que le ocurre a toda la información de la estrella? De acuerdo con los cálculos de Hawking, las partículas emitidas por el agujero no contienen información esencial del estado inicial de la estrella. Aunque hubiera algún tipo de remanente de agujero negro, ¿cómo podría un objeto tan pequeño contener toda la información existente en la estrella original?

La desaparición de la información importa porque uno de los pilares fundamentales de la teoría cuántica es que los estados cuánticos evolucionan de una manera llamada unitaria, por la que ninguna información debería perderse jamás. La información podría ser inaccesible en la práctica, como cuando se quema una enciclopedia, pero en un principio la información contenida en ella sigue presente en el humo y las cenizas.

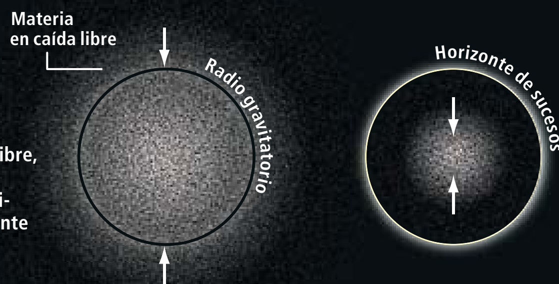
Puesto que los cálculos que predicen la radiación de Hawking descansan en la gravedad semiclásica, los físicos no pueden estar seguros de si la pérdida de información es un artefacto de las aproximaciones empleadas o una propiedad que subsistirá cuando descubramos cómo se computa el proceso con exactitud. Si el proceso de evaporación destruye la información, las ecuaciones correctas de la gravedad cuántica deben violar la naturaleza unitaria de la mecánica cuántica tal y como la conocemos. Por el contrario, si la información se conserva y la teoría completa de la gravedad cuántica revelara dónde se encuentra en la radiación, habría que modificar o la relatividad general o la mecánica cuántica.

NACE UNA ESTRELLA NEGRA

Se forma un agujero negro cuando la materia colapsa por su propio peso y no hay ninguna fuerza que lo impida. La idea común es que los efectos cuánticos no son lo suficientemente grandes para parar el colapso. Los autores no están de acuerdo.

EL COLAPSO RAPIDO NO SE PARA

La polarización del vacío es demasiado pequeña para la materia en caída libre, aun cuando ésta sea una materia con densidad suficiente para formar horizonte de sucesos y convertirse en un agujero negro.

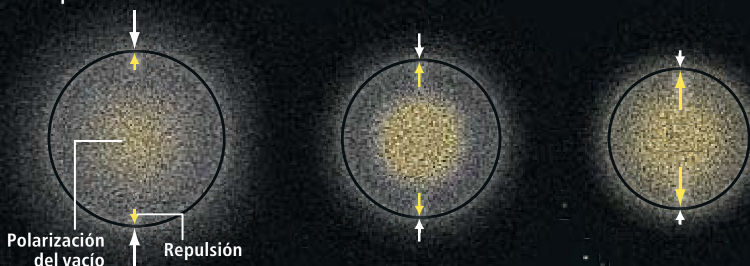


LOS COLAPSOS LENTOS PUEDEN DILATARSE ETERNAMENTE

Si la caída de la materia se ralentiza, la polarización del vacío aumenta y produce una repulsión.

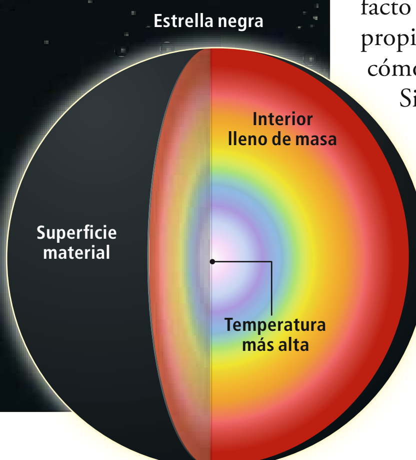
La repulsión frena el colapso e intensifica así la polarización aún más.

Se retrasa el colapso y nunca se llega a formar un horizonte de sucesos.



ESTRELLA NEGRA

El resultado es una estrella negra. El campo gravitatorio a su alrededor es igual que el de un agujero negro, pero el interior de la estrella está lleno de materia y no se forma un horizonte de sucesos. Una estrella negra podría emitir radiación de Hawking, si bien transportaría la información atrapada dentro de la estrella negra; se conservaría, pues, la unitariedad. Si se pudiera pelar una estrella negra capa a capa, como una cebolla, lo que a cada paso iría quedando sería en sí mismo una estrella negra más pequeña, que también emitiría radiación. Los agujeros negros pequeños emiten más radiación y tienen temperaturas más altas que los agujeros mayores; también una estrella negra es más caliente hacia su interior.



LUCY READING-IKKANDA

Una alternativa radicalmente distinta

El problema de la información y otros rompecabezas relacionados nos han motivado (así como a otros equipos) a revisar la línea de razonamiento que condujo a los físicos de la década de los setenta del siglo XX a los agujeros negros casi clásicos con evaporación. Hemos encontrado que la predicción semiclásica de que los agujeros negros se forman por colapso gravitatorio, incluso cuando se tienen en cuenta los efectos cuánticos, depende de varias suposiciones técnicas con frecuencia no declaradas.

En particular, los viejos cálculos suponen que el colapso sucede muy deprisa: necesita el mismo tiempo que se requeriría para que el material de la superficie de la estrella cayera libremente hacia el centro. Encontramos que, para colapsos más lentos, los efectos cuánticos producirían una nueva clase de objeto muy compacto que no tiene un horizonte de sucesos y es, por tanto, mucho menos problemático.

Como ya hemos mencionado, el TRET del vacío cuántico en un espaciotiempo curvado por una estrella típica es despreciable en todas partes. Cuando la estrella comienza a colapsar, el TRET debería cambiar. No obstante, la conclusión antigua de que el TRET continúa siendo ínfimo se sostiene si el colapso ocurre tan rápido como la caída libre.

Sin embargo, si el colapso sucede de manera notablemente más lenta, el TRET puede adquirir valores grandes y negativos en las regiones próximas al radio de Schwarzschild, allí donde se formaría el horizonte de sucesos clásico. Un TRET negativo produce repulsión y a su vez frena aún más el colapso. El colapso podría llegar a su fin justo antes del horizonte, o continuar para siempre a un ritmo cada vez más lento, acercándose más y más a la formación de un horizonte que nunca llegará a nacer de verdad.

Este resultado no hace imposible la creación de agujeros negros. Una nube esférica de materia perfectamente homogénea, digamos de unos 100 millones de soles, que cayese libremente por su propio peso, produciría un horizonte de sucesos. Para cuando alcanza la compacidad necesaria para formar el horizonte, una nube así de grande presenta una densidad comparable a la del agua, demasiado baja para que el TRET crezca e impida la formación del horizonte. Pero sabemos que el universo no siguió ese patrón. Las gigantescas nubes de materia casi homogéneas que aparecieron tras las primeras fases de la gran explosión (*Big Bang*) no colapsaron para formar agujeros negros. En su lugar se desarrollaron otras estructuras.

Primero aparecieron las estrellas; el calor de sus reacciones nucleares retrasó el colapso del gas durante algún tiempo. Cuando una estrella consume casi todo su combustible nuclear podría evolucionar hacia una enana blanca o, si tiene masa suficiente, explotar como supernova y dejar tras de sí una estrella de neutrones (una esfera hecha de neutrones con un tamaño algo superior al radio de gravedad). En cualquier caso, se trata de un efecto puramente cuántico —el principio de exclusión de Pauli— el que impide colapsar más.

OTRAS SALIDAS DEL AGUJERO

Muchos investigadores han propuesto objetos más o menos exóticos como alternativa a la idea común —aunque paradójica— de los agujeros negros evaporantes y que sirvan para explicar los cuerpos compactos y oscuros observados por los astrónomos. El rasgo común a todas las propuestas (y a nuestra hipótesis de las estrellas negras) es la ausencia de un horizonte de sucesos.

ESTRELLAS DE VACIO GRAVITATORIO

La geometría del espaciotiempo alrededor de una "estrella de vacío gravitatorio" (*gravastar*) sería indistinguible de la de un agujero negro mientras se diste más de 10^{-35} metros de la región esférica donde se habría situado el horizonte de un agujero clásico. El horizonte sería sustituido por una envoltura de materia y energía con un espesor de 10^{-35} metros (longitud de Planck, la escala de longitud en la que los efectos cuánticos de la gravedad adquieren importancia). El interior de una estrella de vacío gravitatorio sería un espacio vacío con una polarización tan intensa, que repelería el colapso de la envoltura de materia. En tales objetos hipotéticos, las nociones clásicas de geometría se rompen en la región que separa el interior del exterior.

COMPLEMENTARIEDAD DEL AGUJERO NEGRO

En la mecánica cuántica ordinaria, por complementariedad se entiende que en la observación un objeto se manifestará como partícula o como onda, pero no como ambas naturalezas a la vez. De igual modo, la mecánica cuántica de los agujeros negros podría albergar una nueva clase de complementariedad. Un observador situado fuera del agujero podría tener una descripción de la geometría observable (por ejemplo, una membrana con ciertas propiedades físicas en lugar del horizonte de sucesos), mientras que un observador en el interior del agujero debería utilizar una descripción diferente.

BOLAS DE PELUSA

Los proponentes de las "bolas de pelusa" sostienen que el horizonte podría representar una región de transición entre un exterior con una geometría clásica y un interior cuántico donde no se puede especificar una noción definida de espaciotiempo. El interior sería descriptible con la teoría de cuerdas y no tendría ninguna singularidad. La geometría exterior (por ejemplo, la geometría de un agujero negro de 10^{30} kilogramos) podría contener cualquier número exponencialmente grande de estados cuánticos de cuerdas. La imagen semiclásica de un agujero negro —con un horizonte de sucesos, entropía gigantesca, una temperatura y una emisión de radiación Hawking— respondería a un promedio estadístico de todos los interiores posibles, análogo a la descripción de un volumen de gas que ignora las posiciones y movimientos exactos de los átomos individuales.



LUCY READING-IKKANDA

Los neutrones de una estrella de neutrones no pueden permanecer en el mismo estado cuántico y la presión resultante aguanta el colapso gravitatorio. La misma historia aplicada a los iones y electrones explica la estabilidad de la enana blanca.

Si la estrella de neutrones gana más masa, la aplastante carga gravitatoria supera a los neutrones y de nuevo entra en fase de colapso. Desconocemos qué ocurre después (aunque la formulación ordinaria dice que se formaría un agujero negro). Se ha conjeturado la aparición de una gran variedad de objetos (estrellas de quarks, estrellas raras, estrellas de bosones y bolas Q) estables a presiones demasiado altas para las estrellas de neutrones. Se deben desarrollar mejor las ecuaciones que describen el comportamiento de la masa a densidades mayores que las de los neutrones para saber qué conjetura es la correcta, si alguna lo es.

Por tanto, la experiencia nos dice que la materia que se ajusta a las leyes de la mecánica cuántica parece encontrar siempre mecanismos que frenan el colapso gravitatorio. Aunque cualquier freno pudiera ser sobrepasado (una configuración estable siempre puede pasar a inestable añadiendo más materia), cada proceso que retrasa el colapso proporciona tiempo adicional para que aumente el valor TRET negativo del vacío cuántico. Este TRET podría asumir la tarea de contrapesar el empuje gravitatorio, y puesto que la repulsión aumentaría sin límite, pararía el colapso de la materia e impediría que hubiese un agujero negro.

Estrellas negras

Los cuerpos resultantes bien podrían ser los que hemos bautizado como estrellas negras. Debido a su tamaño tan diminuto y a su alta densidad, comparten muchas propiedades observacionales con los agujeros negros, pero conceptualmente son muy diferentes. Las estrellas negras son cuerpos materiales, con una superficie material y un interior de materia muy densa. Son objetos muy débiles porque la luz de su superficie estaría fuertemente desplazada al rojo —la luz se estiraría— al viajar desde un espacio muy curvo cercano a la estrella negra hasta los lejanos observadores. En principio, podrían realizarse estudios astrofísicos completos de las estrellas negras porque no existe el obstáculo de un horizonte de sucesos.

Dentro de la familia de las estrellas negras, algunas podrían parecerse a los agujeros negros evaporantes porque emitirían una radiación similar a la radiación de Hawking. Para el caso concreto en que el colapso se aproxima a la formación del horizonte de sucesos pero nunca llega a ella, hemos demostrado que la estrella negra emite unas partículas con un espectro de energía del tipo planckiano (muy similar al espectro térmico) y una temperatura ligeramente inferior a la temperatura de Hawking. Al carecer de horizonte, la estrella negra no puede encerrar ninguna información. En su lugar, las partículas emitidas y la materia que reste dentro de la estrella negra albergarán toda la información. La física cuántica estándar describiría la formación y los procesos de evaporación. Las estrellas negras no resuelven el problema de la información mientras existan medios de crear horizontes de sucesos en cualquier punto del universo.

Estos objetos en evaporación podrían llamarse cuasi agujeros negros porque vistos desde fuera tienen aproximadamente las mismas propiedades termodinámicas que los agujeros negros evaporantes. Su interior, sin embargo, mostraría un cambio continuo de temperaturas, en aumento hacia el centro. Si se imagina el objeto como una estructura de capas concéntricas, una estructura de cebolla, cada capa estaría encogiéndose despacio, pero nunca se alcanzaría la compacidad suficiente, ni en la capa ni dentro de ella, capaz de formar el horizonte. El colapso de todas las capas lo impide el TRET del vacío que, según predecimos nosotros, se produciría en un colapso lento. Las capas más interiores mostrarían temperaturas más altas, al igual que los agujeros negros de menor masa. No sabemos si estos objetos tan atractivos existen de forma natural o si son excepcionales.

Sobre el horizonte

El estudio de los agujeros negros ha provocado siempre reacciones muy dispares por parte de los investigadores. Por un lado, resulta excitante pensar que esconden en su interior la puerta a nuevas posibilidades inimaginables de la física, aunque sólo para quienes se decidan entrar. Por otro lado, las implicaciones de los agujeros negros con frecuencia preocupan a los físicos; la búsqueda de otras alternativas a los agujeros negros, casi siempre motivada por el desagrado con una o varias de sus propiedades, es tan antigua como la idea misma de los agujeros.

Nuestra propuesta de estrella negra y las otras alternativas a los agujeros negros propuestas por diferentes grupos tienen en común que el espaciotiempo que rodearía a esos nuevos objetos sería esencialmente idéntico al que rodea un agujero negro clásico, hasta muy, muy cerca de donde se forma el horizonte de sucesos. Aunque la puerta secreta que conduce al conocimiento de cómo se fusionan la física cuántica y la gravedad se halle fuera de nuestro alcance, podría no estar oculta para nosotros en el interior de esa fortaleza impenetrable que es el horizonte de sucesos.

¿QUE VIENE DESPUES?

El próximo estudio sobre el escenario de la estrella negra debe mostrar sistemas físicos específicos en los que la polarización del vacío logre detener el colapso conforme a la gravedad semiclásica.

Al describir los agujeros negros cuánticos como fajos de unos entes fundamentales denominados “branas”, los teóricos de cuerdas han reproducido las predicciones de la gravedad semiclásica para ciertos casos especiales. Esperan poder extender sus resultados a toda clase de agujeros negros.

La solución definitiva del problema de la información y del destino de la materia en colapso requerirá muy probablemente el desarrollo de una teoría completa de la gravedad.

Bibliografía complementaria

FATE OF GRAVITATIONAL COLLAPSE IN SEMICLASSICAL GRAVITY. Carlos Barceló, Stefano Liberati, Sebastiano Sonego y Matt Visser en *Physical Review D*, vol. 77, n.º 4; 19 de febrero, 2008.

SMALL, DARK, AND HEAVY: BUT IS IT A BLACK HOLE? Matt Visser, Carlos Barceló, Stefano Liberati y Sebastiano Sonego en *Proceedings of Black Holes in General Relativity and String Theory*, agosto, 2008.

THE FUZZBALL PROPOSAL FOR BLACK HOLES. K. Skenderis y M. Taylor en *Physics Reports*, vol. 467, n.º 4-5, págs. 117-171; octubre, 2008.

THE BLACK HOLE WAR: MY BATTLE WITH STEPHEN HAWKING TO MAKE THE WORLD SAFE FOR QUANTUM MECHANICS. Leonard Susskind. Little Brown, 2008.

POTENCIADORES DE LA COGNICION

¿Bastará ingerir una píldora con el desayuno para mejorar la concentración y la memoria, sin detrimento de la salud a largo plazo?

Gary Stix

CONCEPTOS BASICOS

- Universitarios y ejecutivos ingieren fármacos estimulantes para reforzar su rendimiento mental, a pesar de que tales productos no fueron aprobados con este fin.
- Algunos expertos en ética y neurocientíficos han planteado la posibilidad de facilitar el acceso a esos fármacos para potenciar las facultades de individuos sanos, que no sufren demencia.
- Se desconoce todavía si un fármaco que "retoque" funciones mentales básicas será lo suficientemente seguro y eficaz para ser consumido de forma habitual, como el café o el té.

Algunos futuristas utilizan el símbolo H+ para representar una versión mejorada de la Humanidad. En esa versión "plus" del género humano estaría desplegada una amalgama de técnicas punteras: células pluripotentes, robótica, drogas potenciadoras de la cognición y recursos similares, cuya pretensión sería la superación de limitaciones físicas y mentales de carácter fundamental.

La idea de potenciar las funciones mentales mediante la ingestión de una píldora que mejore la atención, la memoria y la capacidad de planificación (vale decir, los fundamentos mismos de la cognición) no es ya una mera fantasía de futuristas. Los años noventa del siglo pasado, que el presidente George H. W. Bush proclamó ser "la década del cerebro", han tenido segunda parte en lo que podríamos llamar "la década del cerebro mejorado".

La obsesión por los potenciadores de la cognición se ha evidenciado en artículos de prensa que jalean la arribada de fármacos calificados como "drogas inteligentes", neuropotenciadores, nootrópicos e incluso "viagra cerebral". Una era de refuerzo mental ha llegado ya [*véase* "Fármacos potenciadores del cerebro", Stephen S. Hall, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre 2003]. Los universitarios no dudan en tomar prestadas píldoras de Ritalin recetadas a algún amigo para estudiar toda la noche. Engullen modafinilo (una nueva generación de reconstituyentes) programadores informáticos impelidos a presentar sus trabajos en una fecha fija o ejecutivos que intentan maximizar su lucidez. Los entusiastas juran que esos fármacos no se limitan a inducir la vigilia, como un café cargado, sino que proporcionan además lucidez mental y la agudeza de un bisturí láser para absorber los matices de la química orgánica o explicar los aspectos esotéricos de las obligaciones de deuda subordinada.

Es posible que una era de potenciación mental esté siendo promovida por científicos y laboratorios farmacéuticos ansiosos por traducir las investigaciones sobre las bases moleculares de la cognición en fármacos diseñados para mejorar el rendimiento mental, sobre todo en quienes padecen demencias. Ahora bien, es casi inevitable, por no decir inexorable, que un fármaco que demostrase su eficacia en los enfermos de Parkinson o de Alzheimer le sería recetado a una población más amplia, que también sufre limitaciones, aunque no tan graves, al envejecer. Y los debates, ampliamente difundidos, sobre la ética de la potenciación han reforzado la idea de que algún día todos

SPLASHLIGHT



nosotros podremos disponer de píldoras que mejoren la cognición.

Se ha planteado en artículos científicos y en los medios de comunicación si los potenciadores de la cognición no les concederían a algunos estudiantes ventajas injustas en exámenes de admisión o si los patronos no se pasarían de la raya si exigieran a su personal la ingestión de estos compuestos para llevar al límite la producción de la compañía.

Pero aunque se hayan publicado artículos que hablan de "jefes camello", existen dudas sobre los compuestos reforzadores de la potencia mental. Los fármacos actuales, desarrollados para afrontar problemas de desatención o de somnolencia excesiva, ¿realmente le permiten a un estudiante salir más airoso de un examen o a un ejecutivo superar brillantemente el acerado interrogatorio de un consejo de administración? ¿La seguridad de esas drogas que manipulan funciones cerebrales básicas llegará a ser suficiente para que puedan exhibirse en las farmacias, al lado de los analgésicos y antiácidos de venta sin receta? Todas esas preguntas están suscitando acalorados debates y deliberaciones entre neurocientíficos, médicos y expertos en ética.

Disonancia ética

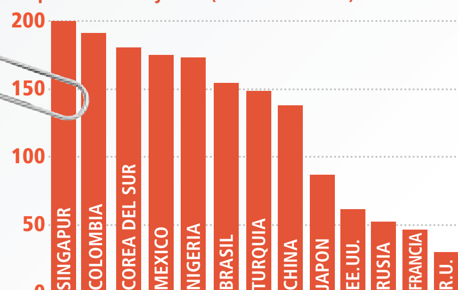
Prescindiendo de los debates sobre seguridad, licitud o coerción, la verdad es que existe una importante demanda de potenciadores de la cognición, que suelen prescribirse para desórdenes como el trastorno por déficit de atención e hiperactividad (TDAH). Según datos oficiales recopilados en 2007, más de 1,6 millones de estadounidenses habían recurrido en algún momento de los 12 meses anteriores, sin receta, a estimulantes que exigen prescripción. Entre los principios activos legales incursos en esa categoría se cuentan el metilfenidato (Ritalin o Rubifen), una anfetamina (Adderall) y el modafinilo (Provigil). En algunas universidades, hasta una cuarta parte de los estudiantes ha confesado que utiliza ese tipo de fármacos. En 2008, en una encuesta informal que *Nature* efectuó en línea entre sus lectores, indicaba que en un 20 por ciento de las respuestas recibidas (un total de 1427 lectores de 60 países) se reconocía el uso de metilfenidato, modafinilo o beta-bloqueantes (estos últimos, por temor al "miedo escénico"). En conjunto, la razón más veces aducida fue la necesidad de mejorar la concentración. Los fármacos suelen adquirirse por Internet, aun-

¿Por qué potenciar?

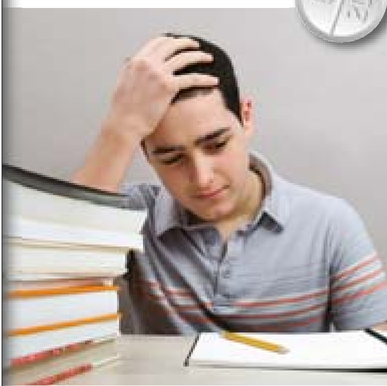
El envejecimiento de la población, las ubicuas farmacias en Internet y una población laboral o estudiantil atrapada en fechas límite y presionada por la obtención de resultados contribuyen a explicar la fascinación ante las drogas potenciadoras de la cognición.

AUMENTO DE LONGEVIDAD PREVISTO (1994–2020)

Incremento porcentual en la población de personas mayores (65 años o más)



FUENTE: British Medical Journal





que también se pueden lograr por prescripción, pues los médicos recetan medicinas aprobadas para una finalidad con el fin de tratar otra (los laboratorios farmacéuticos, sin embargo, no pueden, por ley, promover usos no autorizados de sus medicamentos).

Es de suponer que la ingestión de esos compuestos aumente a la par que el envejecimiento de la población en una economía cada vez más globalizada. Si uno tiene 65 años, reside en Boston y su plan de retiro se ha visto muy mermado, puede verse obligado a continuar en el mercado laboral y a competir con un chaval de 23 años que vive en Mumbai. Para mantenerse alerta y ser eficaz, es posible que esa persona se sienta tentada a recurrir a tales compuestos, explica Zack Lynch, director ejecutivo de Neurotechnology Industry Organization.

El reciente interés por disponer de directrices éticas da por supuesto que esos fármacos son superiores a los placebos y que realmente mejoran algún aspecto de la cognición, sea la atención, la memoria o la "función ejecutiva" (planificación y razonamiento abstracto). En tal supuesto, se argumenta, compete a los expertos en ética reflexionar sobre las ramificaciones suscitadas por la popularidad de esos fármacos. Tal razonamiento desembocó en 2002 en una nueva disciplina, la neuroética, que tendría, en parte, la función de abordar las cuestiones morales y sociales que suscitan los fármacos y otros recursos potenciadores de la cognición (implantes cerebrales y similares).

Un grupo de expertos en ética y neurocientíficos, en una actitud sumamente provocativa, publicó en *Nature* en 2008 un comentario que planteaba una ruptura con la idea de que los fármacos han de constituir, en esencia, tratamientos para enfermedades. El artículo sugería la posibilidad de poner los psicoestimulantes al alcance de los individuos mentalmente sanos, fuera para mejorar el rendimiento en clase o en la sala de juntas, siempre y cuando tales fármacos resultasen seguros y eficaces en personas sanas. Tras citar estudios que demostraban los beneficios de esos fármacos sobre la memoria y sobre diversos procesos mentales, los investigadores equipararon la potenciación farmacológica con "educación, buenos hábitos de salud y tecnología de la información, vías por las que nuestra especie, tan singularmente innovadora, busca su propia perfección".

Seis meses después, John Harris, uno de los autores de ese comentario, profesor de bioética en la Universidad de Manchester, fue más lejos todavía en un artículo de opinión publicado en el *British Medical Journal*. Harris, director editorial del *Journal of Medical Ethics* y autor del libro *Enhancing Evolution*, señalaba que, si se juzga que el metilfenidato ofrece seguridad suficiente para ser utilizado en niños, debería suponerse que es lo bastante inocuo para los adultos interesados en "ponerle turbo" a su cerebro. En una entrevista posterior, Harris sostuvo que preveía una creciente laxitud en las restricciones y que, si no se presentaban problemas de seguridad, ese fármaco (que en EE.UU. requiere receta médica) se acabaría vendiendo con la misma facilidad que la aspirina.

Tamaña gavilla de consideraciones no ha quedado sin respuesta. Otros investigadores y expertos en ética han puesto en duda que fármacos moduladores de procesos mentales lleguen a presentar un perfil de seguridad que justifique su dispensación en las mismas condiciones que un analgésico doméstico, el té o el café.

"Se dice que la potenciación cognitiva viene a ser como mejorar la visión con gafas", opina James Swanson, investigador de la Universidad de California en Irvine, que ha participado en

LUCY READING-IKKANDA (*gráfica y píldoras*); GETTY IMAGES (*estudiante*); LARRY DALE GORDON (*ejecutivo*)

ensayos clínicos de fármacos para el TDAH (Adderall y modafinilo). “Me parece que no se comprenden los riesgos de permitir que un gran número de personas tenga acceso a esos fármacos. Es probable que un pequeño porcentaje llegue a adquirir una dependencia y que algunas vean disminuida su capacidad mental. Por esas razones estoy en contra de su uso generalizado.” En esa misma línea, el Ministerio del Interior británico se encuentra a la espera del informe de una comisión asesora sobre si los posibles daños que la utilización no médica de potenciadores exigieran nuevas normas reguladoras.

Otros científicos afirman que el debate puede resultar estéril, porque la mejora de las destrezas podría no ser factible por medios distintos del tedioso ejercicio de estudiar para un examen de cálculo. Algunos, que han intentado desarrollar fármacos para invertir la pérdida de memoria causada por la demencia, dudan de que la potenciación mental en individuos sanos sea algo más que una remota posibilidad. “A mí no me preocupan gran cosa las consecuencias de los potenciadores de cognición en personas sanas, porque no existen potenciadores de cognición de los que preocuparse”, nos dice Rusiko Bourtchouladze, autor de un popular libro sobre la ciencia de la memoria y colaborador del trabajo que desembocó en un premio Nobel para Eric R. Kandel en 2000. “Hablar de potenciación cognitiva es, con mucho, demasiado prematuro; es posible que no se obtengan tales compuestos en lo que nos queda de vida. Hay demasiado ruido en todo eso.”

En tal planteamiento, la compleja mezcla de señales químicas, enzimas y proteínas que coadyuvan a la formación de un recuerdo crea un equilibrio homeostático, refractario a manipulaciones, a menos que una enfermedad lo perturbe. La degradación de los procesos mentales y del sentido de identidad que acompaña a la demencia podría tratarse por compensación de la pérdida de ciertos compuestos que desempeñan funciones clave y podría merecer el riesgo de efectos secundarios debidos a la intervención del fármaco. Pero la perturbación de la frágil estasis en individuos sanos podría provocar consecuencias inesperadas: por ejemplo, cualquier mejora en la memoria de larga duración (en la que residen los recuerdos de la infancia o de las vacaciones del año pasado) podría quedar contrapesada por una menor capacidad de recuerdo en la memoria operativa (esa especie de libreta donde nuestro cerebro conserva durante algún tiempo un número de teléfono).

Los debates sobre “ética de la neuropotenciación” también se critican y encuadran en la “ética especulativa”. Esa tendencia asedia sin cesar a otras iniciativas, como la nanotecnia, materias sobre las que expertos en ética, científicos y políticos reflexionan en debates sobre las consecuencias sociales de técnicas aún por inventar, trátese de “píldoras inteligentes” o de nanorrobots descontrolados. “Una parte importante del debate sobre la potenciación humana... sufre de inflación de expectativas y de exageración publicitaria de las posibilidades técnicas”, apuntan en *Neuroethics* Maartje Schermer y sus colaboradores de la Universidad Erasmo de Rotterdam.



Luces y sombras

La idea de que los medicamentos existentes pudieran mejorar la cognición en individuos sanos se remonta a casi un siglo. La historia presenta luces y sombras. En 1929, Gordon Alles introdujo para uso médico la anfetamina, una droga sintética similar a la efedrina que se extraía de una hierba china. (Alles también fue el creador del éxtasis, otra anfetamina.) Diversas variantes de ese compuesto se administraron en ambos bandos durante la Segunda Guerra Mundial para mantener alerta a los combatientes e infundirles valor. Alemanes y



REFORZANTES CEREBRALES. ¿DE VERAS?

En la bibliografía y en la prensa popular se citan a menudo las medicinas que vemos (aprobadas para trastornos neurológicos) porque podrían mejorar el funcionamiento mental de las personas sanas. Sin embargo, los resultados son ambivalentes, pues aunque esos fármacos resultasen útiles, los riesgos podrían impedir que los individuos sanos dispusieran libremente de ellos.

FARMACO	USO CLINICO	EFICACIA POTENCIADORA	RIESGOS
Metilfenidato (Ritalin o Rubifen, Concerta y otros) y **anfetaminas** (Adderall y otros)	Estimulantes utilizados para el trastorno por déficit de atención e hiperactividad (TDAH) y la narcolepsia (sueño incontrolable)	Aumenta el rendimiento cognitivo en ciertas tareas en situaciones fatigosas; puede mejorar la capacidad de planificación y cierto tipo de memoria operativa; parece mejorar el funcionamiento en tareas aburridas y repetitivas	Podría empeorar el rendimiento en un subconjunto de usuarios o en tareas complejas; complicaciones cardiovasculares o ataques apopléticos, alucinaciones y adicción
Modafinilo (Provigil)	Estimulante de nueva generación para la narcolepsia y la somnolencia excesiva provocada por el trabajo en turnos o por apnea obstructiva durante el sueño	Parece aumentar la concentración mental y mejorar el rendimiento en un conjunto limitado de medidas cognitivas, como la recordación de ristras largas de números	Posible capacidad adictiva, mayor de lo que se creía; puede provocar urticarias graves
Donepezilo (Aricept)	Tratamiento de los déficits cognitivos del mal de Alzheimer; aumenta la liberación de acetilcolina para mejorar la cognición	Podría facilitar el aprendizaje o la memoria; los resultados globales son ambiguos; puede tardar semanas en hacer efecto y su uso extraoficial está menos extendido	Podría provocar un leve deterioro del rendimiento cognitivo en individuos sanos

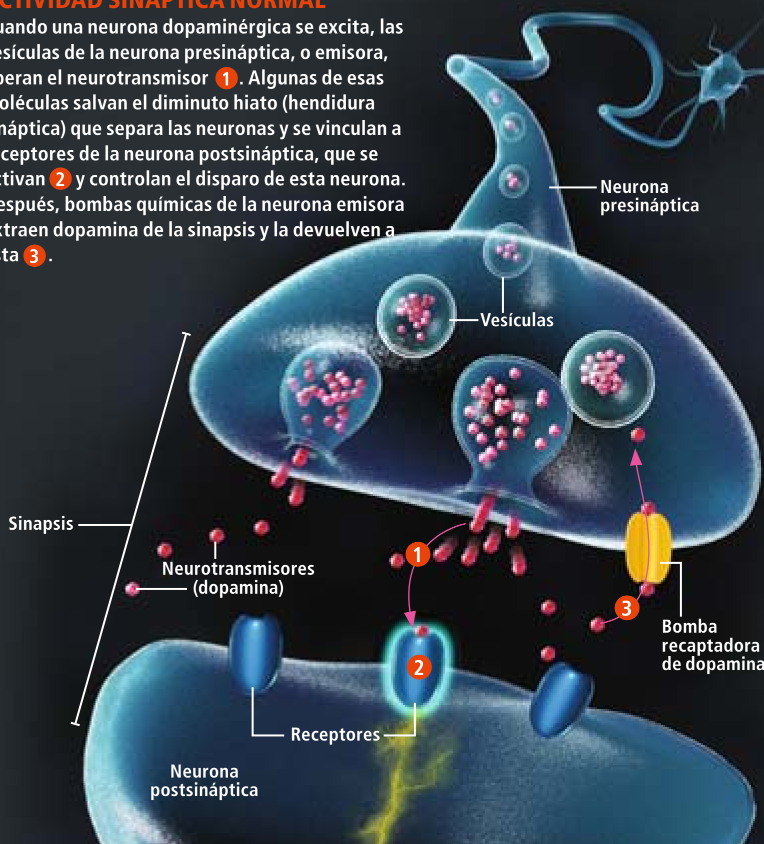
LUCY READING-IKKANDA (*píldoras*)

ASI ACTUAN DOS POTENCIADORES

Algunos presuntos potenciadores, como el metilfenidato y las anfetaminas, alteran la actividad de la dopamina (neurotransmisor) en las uniones entre neuronas (sinapsis). La intensificación de las señales de dopamina puede mejorar el aprendizaje al centrar la atención y el interés en la tarea.

ACTIVIDAD SINAPTICA NORMAL

Cuando una neurona dopaminérgica se excita, las vesículas de la neurona presináptica, o emisora, liberan el neurotransmisor (1). Algunas de esas moléculas salvan el diminuto hiato (hendidura sináptica) que separa las neuronas y se vinculan a receptores de la neurona postsináptica, que se activan (2) y controlan el disparo de esta neurona. Después, bombas químicas de la neurona emisora extraen dopamina de la sinapsis y la devuelven a ésta (3).

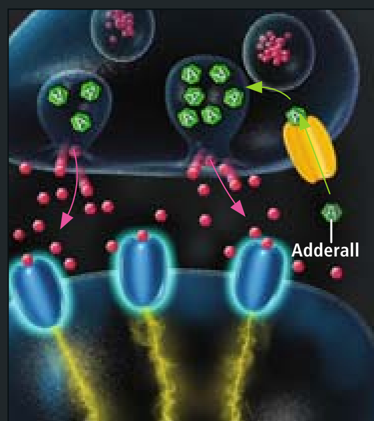


ACTIVIDAD SINAPTICA POTENCIADA

El metilfenidato (Ritalin o Rubifen, y Concerta, entre otros) bloquea la recaptación de dopamina. Se dispone de más dopamina para ligarse a una neurona postsináptica, lo que amplifica la intensidad de la señal eferente de la neurona presináptica.

Adderall y otras anfetaminas ingresan en la neurona presináptica a través del mecanismo de bombeo y provocan el desplazamiento de dopamina a la hendidura sináptica, aumentando la cantidad de neurotransmisor disponible para actuar sobre la célula postsináptica.





ANDREW SWIFT

japoneses ingerían metanfetamina; británicos y estadounidenses utilizaban benzedrina, un compuesto similar al Adderall.

Los científicos se propusieron averiguar si la percepción subjetiva de mejoría en el rendimiento era genuina. En evaluaciones psicológicas efectuadas por británicos y estadounidenses en los años cuarenta se observó que los usuarios de esos fármacos recibían elevadas calificaciones en pruebas que medían la rapidez en la lectura, la multiplicación de números y en otras tareas. Pero, en realidad, las puntuaciones de sus tests no eran, en la mayoría de las tareas, superiores a las obtenidas por sujetos que ingerían cafeína. De hecho, en el caso de tareas de mayor complejidad, el rendimiento podía disminuir. “Debido a que las anfetaminas elevan el estado de ánimo, hacen sentir que realizamos las tareas especialmente bien, cuando en realidad no es así”, afirma Nicolas Rasmussen, de la Universidad de Nueva Gales del Sur en Sidney y autor del libro *On Speed* (New York University Press, 2008). “En pruebas simples de laboratorio que evalúan el rendimiento en tareas aburridas, [las anfetaminas] mejoran las puntuaciones porque aumentan la diligencia en realizarlas. Pero no es lo mismo examinarse en la facultad de derecho que volar durante un combate aéreo.”

El metilfenidato, un compuesto emparentado de cerca con las anfetaminas, apareció en 1956. Se presentó como un estimulante más suave y progresivo que éstas (“el feliz punto medio en la estimulación psicomotriz”, en palabras del fabricante); sin embargo, mediante dosis adecuadas, produce efectos bioquímicos y psicológicos parecidos a los de las anfetaminas. La era dorada de las anfetaminas se produjo hace unos 40 años. En EE.UU. el consumo llegó a ser de 10.000 millones de píldoras a finales de los años sesenta, justo antes de que la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos (FDA) las clasificara como sustancias controladas, que exigían receta médica. Michael S. Gazzaniga, de la Universidad de California en Santa Barbara, uno de los autores del comentario publicado en *Nature*, recuerda que en sus tiempos de estudiante universitario, en los primeros años sesenta, su padre le enviaba benzedrina para ayudarle en el estudio.

Mediados los noventa, el uso creciente de metilfenidato para el tratamiento del TDAH indujo a los investigadores a desplegar nuevas técnicas de obtención de imágenes cerebrales y refinados tests neurofisiológicos para examinar los efectos del fármaco en individuos sanos, con el propósito de hallar una referencia basal para la comparación con pacientes de TDAH y de otros trastornos neurológicos. En un artículo de 1997 publicado en *Psychophar-*



macology, Barbara Sahakian, Trevor Robbins y sus colaboradores, de la Universidad de Cambridge, demostraban que el metilfenidato mejoraba el rendimiento cognitivo en diversas medidas (memoria de trabajo espacial y planificación) en un grupo de hombres jóvenes sanos y descansados, pero no en otras (atención y fluidez verbal). Al irse desarrollando las pruebas, los voluntarios parecían cometer más errores en sus respuestas, debido, posiblemente, a una mayor impulsividad inducida por el fármaco.

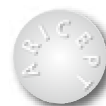
Esos mismos investigadores hallaron escasos beneficios cognitivos en varones sanos de edad avanzada. Y en 2005, expertos de la facultad de medicina de la Universidad de Florida en Gainsville no apreciaron ningún refuerzo en la cognición de un grupo de 20 estudiantes de la facultad que habían sido privados de sueño. Siempre se le ha achacado al metilfenidato un efecto que también presentan las píldoras de cafeína —la posibilidad de arritmias cardíacas— y su posible abuso como "droga recreativa". La adicción es rara a dosis normales. Pero en los años setenta, los usuarios de metilfenidato fueron convirtiéndose de forma sistemática en adictos tras inhalar o inyectarse la droga, a la que llamaban "Costa Oeste".

La droga de la lucidez duradera

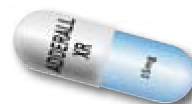
La ambigua herencia de las anfetaminas llevó a médicos y neurocientíficos a aclamar la llegada del modafinilo como agente promotor de la vigilia, cuyos efectos secundarios y perfil de adicción parecían más favorables que las anfetaminas. El modafinilo (introducido en EE.UU. en 1998), que capacita para trabajar largos períodos sin necesidad de descansos, se ha convertido en parte del estilo de vida de personas que sufren los efectos circadianos de los viajes largos y que tratan de vivir en cuatro zonas horarias al mismo tiempo.

Jamais Cascio, del Instituto del Futuro de Palo Alto, en California, consiguió que su médico le recetase modafinilo, del que amigos suyos, grandes viajeros, le habían hablado. Cascio observó que en viajes transoceánicos no sólo le hacía sentirse más despierto, sino también más en forma. Percibía una mayor concentración cognitiva y claridad de pensamiento. Explica que no tuvo la sensación de haberse convertido en un supercerebro; antes bien, se trataba de una sensación de traslación más fácil hacia un estado de flujo cognitivo, de poder trabajar sin distracción.

En pruebas controladas se han confirmado algunas de las impresiones de Cascio. Sahakian y Robbins comprobaron en 2003 que 60 voluntarios varones sanos y descansados obtuvieron mejores resultados en algunas medidas neuropsicológicas (recordación de secuencias numéricas); en otras, en cambio, no hubo variación. Otros investigadores han observado efectos beneficiosos del fármaco de marras, aunque no convertirá a un zoquete en un genio. Por otra parte, en ninguno de esos estudios se han examinado los efectos sobre la cognición a lo largo de períodos prolongados.



Sigue siendo improbable el libre acceso al modafinilo o al metilfenidato, porque los fármacos tienden a afectar de forma distinta a cada persona. Al parecer, en usuarios con cocientes intelectuales bajos el modafinilo produce aumentos del rendimiento notables, mientras que en sujetos de mayor capacidad innata los beneficios son escasos o nulos. En el caso del metilfenidato, mejoran quienes tienen una memoria operativa pobre; sin embargo, quienes poseen de forma natural una mayor capacidad de memoria exhiben beneficios mucho menores.



Como ocurrió con las anfetaminas, el modafinilo no fue resultado de una comprensión fundamental del funcionamiento neurobiológico del cerebro. Las investigaciones recientes indican, no obstante, que este fármaco guarda relación con varios neurotransmisores, compuestos que desencadenan la excitación de determinados grupos de neuronas. El mecanismo de actuación del fármaco todavía está por elucidar. Pero Nora D. Volkow, directora del Instituto Nacional de Abuso de Drogas, y sus colaboradores han descubierto, no ha mucho, que uno de esos neurotransmisores es la dopamina, el mismo compuesto que resulta potenciado por las anfetaminas y que imbuye en esas drogas su potencial adictivo. Contrariamente a lo que se creía, el metilfenidato y el modafinil se parecen mucho en su actuación sobre el sistema de dopamina del cerebro. Sin embargo, las probabilidades de abuso son reducidas, porque no resulta práctico fumar o ingerir modafinilo para lograr un "subidón". Otro impedimento que frena su difusión viene de la FDA, que lo rechazó en 2006 para el tratamiento de niños con TDAH, pues en algunos casos provocaba urticarias graves.

Aunque se cambie el envase de las antiguas drogas reforzantes de la atención y se las presente como potenciadoras de la cognición para estudiantes, ejecutivos y programadores en apuros, los beneficios en estas personas seguramente no pasen de margi-

AYUDAS PARA COMBATIENTES

La idea de que una píldora pudiera mejorar el rendimiento físico y mental de individuos sanos se hizo creíble durante la Segunda Guerra Mundial. En ambos bandos se consumieron millones de anfetaminas, como estas "wakey wakey" que un oficial médico de la RAF le está facilitando a un tripulante de un bombardero.



LUCY READING-IKKANDA (*píldoras*); CORTESIA DE COMMONWEALTH AIR TRAINING PLAN MUSEUM (*fotografía*)



nales sobre los efectos de un café cargado. El problema de la definición de "potenciador" ha promovido la creación en el seno del Colegio estadounidense de Neuropsicofarmacología de un grupo que se propone cribar las normas que habría de cumplir un producto para ser clasificado como "potenciador de cognición". Es posible que, en última instancia, acaben llegando desde investigaciones en otros campos. Los conocimientos adquiridos sobre cómo se traduce la imagen de un bebé o el nombre de un amigo en un recuerdo duradero han preparado el terreno para nuevos compuestos diseñados para mejorar el estado de víctimas del alzheimer o de otras demencias.



El optimismo al respecto de una nueva generación de fármacos se debe en parte a avances en investigaciones básicas sobre los procesos bioquímicos que subyacen bajo la formación de recuerdos. Se ha demostrado en más de 30 tipos de ratones transgénicos una capacidad para adquirir información y almacenarla en la memoria de larga duración superior a la del ratón medio. "Por primera vez en la historia de la neurociencia, disponemos del espinazo de la biología molecular y celular de la memoria", explica Alcino J. Silva, de la Universidad de California en Los Angeles. "Para la sociedad implica que por primera vez podemos servirnos de ello para empezar a cambiar nuestra forma de aprender y de recordar."

Pero los fármacos para la memoria realmente eficaces se encuentran muy lejos todavía, debido, en parte, a problemas científicos. La mayoría de las 200 mutaciones genéticas introducidas en ratones por investigadores de todo el mundo provocan déficits. Silva recuerda que un ratón de su laboratorio ilustra las posibles contrapartidas a las que deberán enfrentarse los investigadores durante el desarrollo de un potenciador de la cognición. Los animales aprendieron más rápidamente que los ratones normales, no modificados, pero no lograron terminar un complicado rompecabezas que se les planteó. Si se les enseñaban cosas sencillas, las aprendían de inmediato, pero las más complicadas, no lograban aprenderlas. Silva estima en decenios el tiempo requerido para obtener, de esas investigaciones, fármacos utilizables de forma regular.

Los problemas logísticos no son menos desalentadores. Varias de las primeras compañías en entrar en liza, algunas de ellas fundadas por investigadores de primera fila, han fracasado. *Science* citaba en 2004 cuatro nuevas firmas (Sention, Cortex Pharmaceuticals, Memory Pharmaceuticals y Helicon Therapeutics) como ejemplos de una tendencia. Pero Sention ha cerrado; Cortex está en apuros y busca un socio desesperadamente. En 2008, Hoffmann-LaRoche compró a precio de saldo Memory (menos de un dólar por acción), cofundada por Kandel, premio Nobel, tras una serie de despidos y de ensayos clínicos fallidos. Helicon ha sobrevivido gracias a la largueza del multimillonario Kenneth Dart, magnate de la espuma de poliestireno, seducido por la perspectiva de fármacos para la memoria (la compañía ha venido desarrollando un compuesto que modulase una vía asociada al glutamato, un neurotransmisor que activa una intrincada senda de señalización celular asociada a la formación de recuerdos duraderos).

Dart NeuroScience, una compañía hermana, se encarga ahora del desarrollo de principios activos, dejando a Helicon la tarea de los ensayos clínicos. Helicon ha recibido hasta ahora financiación por más de 70 millones de euros, pero no ha alcanzado todavía las pruebas clínicas de fases avanzadas para ninguno de sus posibles fármacos. Tim Tully, jefe científico de Helicon, cofundador de la compañía cuando pertenecía al Laboratorio Cold Spring Harbor, no prevé que sus creaciones lleguen jamás a convertirse en medicinas de tanto éxito como Viagra o Prozac. Y añade: "A los medios les

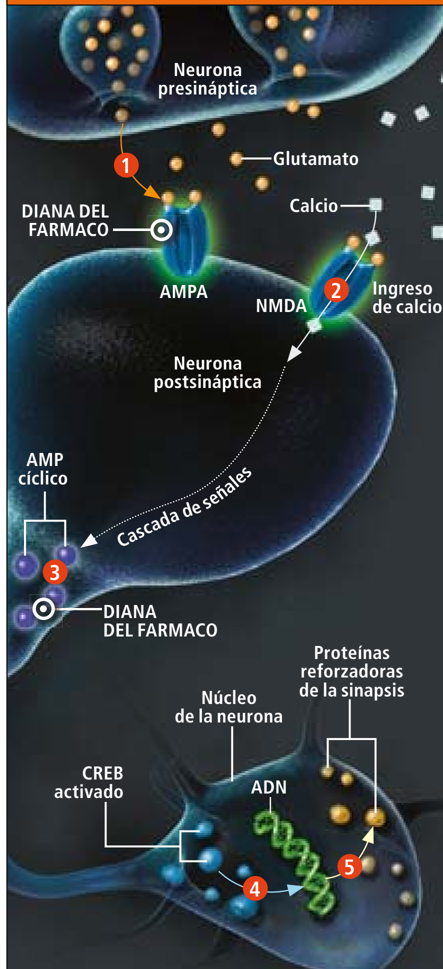
POTENCIADORES: EXPECTATIVAS

Los laboratorios farmacéuticos tienen planes contra diversas formas de demencia, desde las propias del mal de Alzheimer hasta la pérdida de memoria asociada al envejecimiento. Esos agentes, de los que aquí se mencionan algunos, y muchos de los cuales tienen todavía que pasar por ensayos clínicos de fases avanzadas, podrían acabar siendo utilizados por personas sanas que ambicionen mejorar su rendimiento mental. Pero no se sabe qué eficacia ni qué seguridad ofrecerían en personas sin deficiencias cognitivas.

TIPO DE COMPUESTO	FUNCION	LABORATORIOS
Activadores nicotínicos de receptores de acetilcolina	O bien aumentan la concentración de acetilcolina (neurotransmisor) en las sinapsis neuronales, o bien ocupan el lugar de la acetilcolina en la sinapsis y activan el receptor nicotínico de acetilcolina, reforzando la atención, la memoria y otras facetas de la cognición.	Abbot, CoMentis, EnVivo, Targacept/AstraZeneca y Xytis
Ampaquinas	Actúan sobre los receptores AMPA para intensificar las respuestas neuronales al glutamato (neurotransmisor), actividad que debería facilitar la fijación de recuerdos duraderos	Cortex Pharmaceuticals; Eli Lilly, GlaxoSmithKline/Neurosearch, Organon, Pfizer y Servier
Inhibidores de la PDE (fosfodiesterasa)	Un tipo de bloqueador de la PDE permite que un nucleótido señalizador, el AMP cíclico, se mantenga activo durante más tiempo en las neuronas cerebrales, con lo que refuerza la actividad de CREB, una proteína importante para la formación de recuerdos duraderos	Helicon Therapeutics, Hoffmann-La Roche y Merck
Antihistamínicos	Bloquean el receptor de histamina H3, lo que mejora el estado de vigilia, la atención y la cognición. Un compuesto que interactúa con el receptor H1, desarrollado en Rusia contra la fiebre del heno, se encuentra ya en ensayos clínicos avanzados para servir de potenciador.	GlaxoSmithKline, Johnson&Johnson y Medivation/Pfizer

LUCY READING-IKKANDA (*píldoras*)

FARMACOS PARA LA MEMORIA



Se han investigado (en un caso durante casi 20 años) fármacos que refuercen la cognición actuando sobre moléculas que intervienen en la memoria de larga duración.

Se piensa en neurociencia que la memoria de larga duración implica la fijación del neurotransmisor glutamato a dos tipos de receptores en neuronas recipientes. Una vez ligado, el receptor AMPA (1) hace que el otro receptor ligado (de tipo NMDA) abra un canal iónico que permite el ingreso de calcio (2). El calcio hace partir un tren de señales que activa una molécula, el AMP cíclico (3), que, a su vez, activa a otras moléculas que migran hasta el núcleo celular y activan la proteína CREB (4). CREB opera sobre el ADN de modo tal que se sintetizan proteínas que retornan a la sinapsis y refuerzan la conexión de señales entre las neuronas emisoras y receptoras de glutamato (5). Fármacos que hacen más eficiente este proceso (mediante la intensificación de las señales por medio de los receptores AMPA o haciendo que el AMP cíclico opere durante más tiempo) han superado varios ensayos clínicos.

ANDREW SWIFT

encanta ignorar los posibles efectos secundarios y saltan directamente a especulaciones temerarias, hablando de fármacos que mejoran la calidad de vida. Creo que se equivocan de medio a medio. La realidad es que si uno padece alguna forma debilitante de merma de la memoria, esas drogas pueden resultarle útiles, pero probablemente sean demasiado peligrosas para los demás."

A pesar de las advertencias, los laboratorios siguen esforzándose en desarrollar potenciadores de la cognición para el mal de Alzheimer y otras demencias. Entre los compuestos que se están considerando se encuentran algunos que alteran los efectos de ciertos neurotransmisores (distintos del glutamato), entre ellos, receptores que son activados por la nicotina del tabaco (aunque no el vinculado al hábito de fumar). Una de las razones de que se fume es que la nicotina contribuye a aguzar la atención.

Las lecciones que se puedan extraer de los fármacos contra la demencia podrían conducir a principios activos que aliviasen problemas cognitivos más leves y asociados al envejecimiento normal, suponiendo que tales agentes no lleguen lastrados con efectos secundarios intolerables. De resultar suficientemente inocuas, las píldoras en cuestión podrían abrirse paso hasta las residencias de estudiantes o los despachos de los ejecutivos. "En la profesión farmacéutica se reconoce que un potenciador cognitivo de éxito podría batir récords de ventas", afirma Peter B. Reiner, profesor de neuroética en la Universidad de Columbia Británica.

A punto de entrar en el mercado

El descubrimiento de los compuestos potenciadores de la cognición merced al conocimiento de los procesos moleculares que la subyacen entrañaría una gran satisfacción científica; sin embargo, los primeros agentes nuevos en llegar al mercado para tratar la demencia y otros trastornos cognitivos podrían no ser fruto de una honda comprensión del funcionamiento neuronal. Sí, en cambio, del feliz descubrimiento de que algún compuesto aprobado ya para otra finalidad repercute en la cognición. Por ejemplo, un posible principio activo, que recientemente ha iniciado los ensayos de fase III para disfunciones cognitivas del Alzheimer, fue desarrollado en Rusia como antihistamínico contra las alergias primaverales; más tarde se descubrió que poseía propiedades contra la demencia. El mercado, que puede ser enorme, ha llevado a algunas compañías a tomar rutas poco ortodoxas, con tal de que las conduzcan hasta él, y a retomar fármacos que fallaron o cuyos ensayos clínicos fueron incompletos, y venderlos como suplementos dietéticos o como "alimentos médicos", cuya regulación es menos estricta que la de los medicamentos.

También es posible que aparezcan nuevos medicamentos si las agencias reguladoras aprueban ampliaciones de usos lícitos para fármacos de los que ya se sabe que influyen en la cognición. Cephalon, fabricante del modafinilo, ha tomado esta senda: ha logrado que la FDA autorice su uso para trabajadores por turnos, que componen un grupo mucho más numeroso que el de los narcolépticos (o hipersomnes, que sufren episodios de sueño incontrolado), para quienes se aprobó en un principio. (Cephalon ha pagado alrededor de 300 millones de euros a dos estados y al gobierno federal para promocionar tres fármacos, entre ellos el modafinilo, para usos previamente no aprobados.) El impulso para mejorar la cognición —sea para intensificar la concentración o para recordar el número de teléfono de los amigos— puede resultar tan coactivo, para fabricantes y consumidores, que llegue a imponerse sobre los inevitables riesgos que conlleva el juguetear con la circuitería neuronal que imbuye en nosotros el sentido fundamental de lo que somos.

Bibliografía complementaria

MEMORIES ARE MADE OF THIS: HOW MEMORY WORKS IN HUMANS AND ANIMALS. Rusiko Bourtchouladze. Columbia University Press; 2002.

TOWARDS RESPONSIBLE USE OF COGNITIVE-ENHANCING DRUGS BY THE HEALTHY. Henry Greely et al. en *Nature*, vol. 456, págs. 702-705; 11 de diciembre, 2008.

THE MOLECULAR AND CELLULAR BIOLOGY OF ENHANCED COGNITION. Yong Seok Lee y Alcino J. Silva en *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 10, págs. 126-140; febrero, 2009.

THE FUTURE OF PSYCHOPHARMACOLOGICAL ENHANCEMENTS: EXPECTATIONS AND POLICIES. Maartje Schrmer et al. en *Neuroethics*, vol. 2, págs. 75-87; julio, 2009.

EXPLOTACION DE LAS RESERVAS DE PETROLEO

Técnicas avanzadas extraerían hasta la última gota

LEONARDO MAUGERI



LANCE IVERSEN *Corbis*

Cuando se descubrió el yacimiento petrolífero californiano del río Kern en 1899, se estimó que la gran viscosidad del crudo permitiría extraer sólo un 10 por ciento del depósito. En 1942, tras más de cuarenta años de extracción moderada, la reserva todavía recuperable se valoró en 54 millones de barriles de crudo, una pequeña parte de los 278 millones de barriles ya obtenidos. En 1995, el experto Morris Adelman señaló que en los 44 años siguientes el campo produjo no ya 54, sino 736 millones de barriles, y aún le quedaban otros 970 por extraer. Pero hasta esa última estimación resultó errónea. En noviembre de 2007, la petrolera Chevron, a la sazón explotadora del yacimiento, anunció que la producción acumulada había alcanzado los dos mil millones de barriles. Al día de hoy, el yacimiento del río Kern produce cerca de 80.000 barriles diarios; el estado de California estima en unos 627 millones de barriles el resto de sus reservas.

En los años sesenta del siglo pasado, Chevron comenzó a aumentar sensiblemente su producción mediante la inyección de vapor en el subsuelo, técnica novedosa en aquellos tiempos. Aparecieron luego nuevos instrumentos de prospección y perforación que, unidos a la persistente inyección de vapor, convirtieron el yacimiento en una rica cornucopia petrolera.

Pero el río Kern no es un caso aislado. Se cree que la producción de un campo petrolífero describe una curva acampanada, la curva de Hubbert (por el difunto King Hubbert, geólogo de la Shell Oil); su máximo se alcanzaría al haberse extraído la mitad del crudo detectado. Sin embargo, la mayoría de los campos petrolíferos reviven al cabo del tiempo: podría decirse que lo que verdaderamente prolifera son las técnicas de extracción.

CONCEPTOS BASICOS

- Las predicciones sobre un cercano declive de la producción mundial de petróleo y su casi total agotamiento al cabo de pocos decenios quizás adolezcan de un pesimismo excesivo.
- El autor pronostica que, hacia 2030, los avances técnicos permitirán extraer de los pozos la mitad del crudo que se haya detectado en el subsuelo, elevando así el actual promedio del 35 por ciento.
- Junto con nuevos descubrimientos, el incremento de la productividad podría hacer que el petróleo perdure al menos otros cien años.



CUESTA PREDECIR la producción total de un depósito. En el campo californiano del río Kern (*final de la página y páginas anteriores*), la producción (*amarillo*) ha batido una y otra vez todas las estimaciones del crudo extraíble (*rojo*).

1899



Estimación de reservas extraíbles

1942

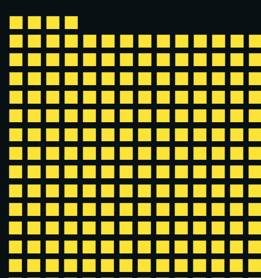


Producción de crudo hasta esa fecha



Estimación de las reservas extraíbles restantes

2007



Producción de crudo hasta la fecha



Estimación de las reservas extraíbles restantes

1 cuadrado = 10 millones de barriles

Numerosos analistas auguran hoy que la producción global de crudo culminará dentro de unos pocos años y luego descenderá, siguiendo la curva de Hubbert. Mi opinión es que estas predicciones no acertarán, como ha sucedido con otras similares sobre el cenit del petróleo [*véase* "Fin de la era del petróleo barato", por Colin J. Campbell y Jean H. Laherrère; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 1998 y "Los límites del crecimiento tras el cenit del petróleo", por Charles A. S. Hall y John W. Day, Jr.; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 2009]. Los nuevos métodos de prospección han descubierto más secretos de la Tierra. Se puede ahora obtener crudo de zonas antaño inaccesibles y de lugares donde la perforación no resultaba rentable. Los métodos avanzados de exploración y extracción pueden mantener al alza la producción de crudo en los próximos decenios y conseguir que los suministros de petróleo perduren un siglo más, como mínimo.

Aunque el petróleo y otros combustibles fósiles encierren riesgos para el clima y el medio, las fuentes de energía alternativas no pueden por ahora competir en versatilidad, coste, facilidad de transporte y almacenamiento. Al tiempo que se investigan otras fuentes, tendremos que asegurar un consumo responsable del petróleo.

Lo que no podemos desaprovechar

En una época amenazada por un próximo cenit de la producción de crudo y la caída subsiguiente, quizá nos sorprenda saber que la mayor parte de los recursos detectados del planeta yace sin explotar en el subsuelo y que todavía quedan más por descubrir.

En apariencia, el crudo de petróleo debería durar sólo unos pocos decenios. En 2008, a punto de sobrevenir la crisis económica que aplastó el consumo, el mundo gastaba unos 30.000 millones de barriles de crudo al año. Suponiendo que en el próximo futuro el consumo recuperara los niveles de 2008 y que después se mantuviera constante, las reservas confirmadas del planeta (estimadas hoy entre 1,1 y 1,3 billones de barriles) nos abastecerían apenas 40 años.

Pero de tales reservas conocemos sólo valores estimados, no fijos. Se definen como la cantidad de crudo detectado cuya extracción mediante las técnicas actuales resulta rentable: la definición cambia, pues, conforme las técnicas avanzan y el precio del crudo varía. Si la producción se limita o la demanda aumenta, los precios de reventa se disparan y el crudo cuya extracción era demasiado costosa pasa a formar parte de las reservas confirmadas. Por esa razón, la mayoría de los campos petrolíferos han producido mucho más de lo que prometían las estimaciones iniciales de sus reservas, superando incluso las de su contenido total. En la actualidad, en un yacimiento medio se ha extraído sólo un 35 por ciento del crudo: cerca de dos tercios quedan bajo tierra. En los debates sobre el futuro del petróleo rara vez se menciona esta cuestión.

Hasta un país tan petrolero como EE.UU., cuya producción de crudo desciende desde el decenio de los setenta (si bien más despacio que en las predicciones de Hubbert), todavía encierra en el subsuelo enormes bolsas de petróleo sin explotar. Aunque las reservas nacionales confirmadas asciendan actualmente a sólo 29.000 millones de barriles, el Consejo Nacional del Petróleo (NPC) estima que quedan todavía 1124 billones de barriles bajo tierra, de los que 374.000 millones podrían recuperarse con las técnicas disponibles.

A una escala global, el Servicio Geológico estadounidense estima que el volumen total de los depósitos de crudo ordinario de petróleo se sitúa entre siete y ocho billones de barriles. Pero con la técnica, la experiencia y los precios actuales sólo es posible extraer de forma renta-

SCIENTIFIC AMERICAN; FUENTE: LEONARDO MAUGERI (*tabla*); DAVID MCNEW *Getty Images* (*fotografía*)



Campo de petróleo del río Kern

TIERRAS (Y MARES) INEXPLORADOS

El crudo de petróleo se encuentra en rocas sedimentarias de los continentes y plataformas continentales. Gran parte de la superficie de las placas continentales terrestres está formada por cuencas sedimentarias (*negro*). Sin embargo, sólo un tercio de esta superficie ha sido objeto de prospección petrolífera con las técnicas modernas, que permiten localizar yacimientos bajo depósitos salinos de miles de metros de espesor. En EE.UU. se han perforado muchos más pozos de exploración (*2000 por cada punto amarillo*) que en cualquier otro país del mundo.



JEN CHRISTIANSEN; FUENTES: IHS PEPS/E&P STATISTICS; IHS EDIN-GIS DATABASE (WWW.IHS.COM/ENERGY)

ble una parte de ese crudo, que se clasificará, por tanto, como reserva confirmada.

Y aquí no acaba todo.

Sólo se han explorado a fondo, con técnicas modernas, un tercio de las cuencas sedimentarias (formaciones geológicas que podrían contener petróleo) del planeta (*véase el mapa*). Por si fuera poco, los datos del Servicio Geológico no incluyen otras formas de petróleo, como los aceites ultrapesados, las arenas, los esquistos y las pizarras bituminosas, que en conjunto abundan tanto o más que el crudo estándar.

Así pues, un país o una compañía petrolera podría aumentar sus reservas del preciado oro negro sin tener que explotar nuevas regiones o fronteras, siempre que pudiera extraer más crudo de los yacimientos confirmados. Sin embargo, no siempre resulta fácil conseguirlo.

Se empieza por las rocas

En contra de la creencia general, el crudo no yace en extensos lagos o cuevas subterráneas. Si pudiéramos "ver" un depósito de crudo, contemplaríamos sólo una estructura rocosa que, en apariencia, no deja lugar al petróleo. Sin embargo, fuera del alcance del ojo humano, todo un mundo de poros y microfracturas en la roca atrapa minúsculas gotas de crudo, junto con agua y gas natural.

La naturaleza ha creado tales formaciones a lo largo de millones de años. Al principio se acumularon en el fondo de los antiguos mares enormes depósitos de vegetación y microorganismos muertos, que luego se descompusieron y quedaron enterrados bajo sucesivas capas de roca. Las altas presiones y temperaturas fueron transformando poco a poco los sedimentos orgánicos en los actuales depósitos de crudo y de gas natural. Esos combustibles fósiles empapan la roca porosa del subsuelo a la manera del agua infiltrada en la piedra pómez.

Cuando se perfora un depósito, éste se comporta como una botella de cava descorchada: el crudo se libera de su antigua prisión rocosa; la presión interna del depósito lo expulsa a la superficie en compañía de piedras, lodos y otros residuos. El proceso continúa hasta que se agota la presión, lo que suele ocurrir al cabo de algunos años. Esta primera etapa de la extracción acostumbra a proporcionar del 10 al 15 por ciento del crudo almacenado. A partir de ahí, la extracción debe ser asistida.

Cerca de un tercio del crudo remanente en el depósito después del "descorche" inicial se considera crudo inmóvil: gotas atrapadas por intensas fuerzas capilares en el interior de poros aislados en la roca. Hasta ahora no hay técnicas que permitan extraer esa porción del crudo. Los dos tercios restantes, aunque puedan desplazarse, no afluirán necesariamente a los pozos por sí mismos. De hecho, casi la mitad de ese crudo móvil quedará atascada en el interior del depósito debido a obstáculos geológicos o a la escasa permeabilidad, como

sucede cuando los poros son demasiado angostos. La situación todavía empeora si el crudo no es un líquido ligero, sino una sustancia pesada y viscosa como una melaza.

Para que el resto del crudo pueda filtrarse a través de los poros y afluir a los pozos, suele inyectarse en el depósito gas natural y agua. Ello corresponde a la extracción secundaria. La inyección de gas restablece la presión perdida e impulsa el crudo con fluidez suficiente para filtrarse por los poros de la roca. Entre tanto, al ser el crudo menos denso que el agua, la inyección de agua lo hace subir hacia el pozo, del mismo modo que el agua vertida en un vaso lleno de aceite desplaza hacia arriba el aceite.

Más o menos en el decenio pasado, la distinción entre extracción primaria y secundaria se borró cuando las compañías petroleras empezaron a aplicar técnicas avanzadas desde un principio. Uno de los avances más destacados ha sido el pozo horizontal: una estructura en forma de L que proporciona mucho más crudo que la tradicional perforación vertical utilizada desde los comienzos de la explotación petrolífera. La configuración en L permite que los pozos horizontales cambien su dirección y penetren en secciones del depósito de otro modo inalcanzables. El método se adoptó comercialmente hacia 1980; resulta especialmente adecuado para depósitos en los que el crudo y el gas natural se disponen en finas capas horizontales.

Los instrumentos de exploración también se han perfeccionado. Las avanzadas imágenes tridimensionales del subsuelo, obtenidas por las reflexiones de ondas sísmicas en las fronteras entre estratos rocosos de diferente composición, permiten hoy apreciar con mayor detalle la estructura de los yacimientos; ello facilita la elección del punto donde se ha de perforar para que la extracción sea óptima.

Las técnicas de obtención de imágenes permiten "ver" lo que subyace bajo las capas de sal que se distribuyen de forma irregular bajo el lecho oceánico, a veces con más de 5000 metros de espesor. A semejanza de las aguas heladas, las formaciones salinas solían ser un formidable obstáculo porque enturbiaban las ondas sísmicas utilizadas para reconstruir la imagen del subsuelo.

Tales innovaciones en las imágenes, combinadas con técnicas más avanzadas en el medio marino, han abierto nuevas regiones oceánicas

El autor

Leonardo Maugeri es economista y vicepresidente ejecutivo de la petrolera italiana Eni, así como profesor invitado del Instituto de Tecnología de Massachusetts y miembro del Consejo Externo Asesor de Energía de tal institución. Su libro *The Age of Oil* obtuvo en 2007 el premio Choice Award de Estados Unidos.



▲ Los depósitos de petróleo no son lagos subterráneos, sino capas de roca porosa empapada de crudo. Esta piedra de cinco centímetros de altura procede de fondos submarinos próximos a Sicilia, cuya explotación sería demasiado cara con las técnicas actuales. Sus gruesas vetas son macizas al tacto, parecen simples manchas sobre la blanca roca de carbonato.

EXTRACCION EN TRES FASES

Sólo del 10 al 15 por ciento del crudo del depósito aflora espontáneamente tras la perforación (*fase primaria*). Una vez agotada la presión interna, se inyecta en el subsuelo agua o gas natural forzando la expulsión de más crudo (*fase secundaria*), de modo que se llega a extraer del 20 al 40 por ciento del crudo original. El resto, o bien queda atrapado en pequeños embolsamientos aislados (y por ello es irrecuperable), o es demasiado viscoso para afluir a los pozos. Pero con técnicas más avanzadas (*recuadro en la página opuesta*) es posible fluidificar el crudo y elevar la extracción total hasta un 60 por ciento al menos (*fase terciaria*).



CORTESIA DE DARIO SPERANZA (*roca*); JEN CHRISTIANSEN (*ilustración*)

a las prospecciones petrolíferas. En los años setenta, cuando se establecieron los campos del mar del Norte, parecían haberse alcanzado los logros más impresionantes de la explotación submarina: se obtenía crudo de yacimientos cubiertos por entre 100 y 200 metros de agua y a unos 1000 metros bajo el lecho marino. Pero en los últimos años se han conseguido extracciones desde profundidades de 3000 metros de agua más 6000 metros de sal y roca. Ha habido al menos tres importantes descubrimientos submarinos a gran profundidad: Thunder Horse y Jack, en el golfo de México, y Tupi en aguas de Brasil.

Rebañar hasta la última gota

Conforme los pozos se hallan cada vez más lejos y a mayor profundidad, las técnicas evolucionan para sacar más petróleo de la roca una vez completadas las primeras fases de la extracción. Las etapas primaria y secundaria recuperan en conjunto del 20 al 40 por ciento del depósito. Para superar esa proporción y entrar en la extracción "terciaria" suele ser preciso fluidificar el crudo restante por medio de calor, gases, tratamientos químicos o microbiológicos. La inyección de vapor, uno de los métodos térmicos más utilizados, resultó decisiva para resucitar el viejo campo del río Kern en los primeros años sesenta. El vapor inyectado calienta la formación rocosa superpuesta y permite el desplazamiento del crudo. Hasta la fecha, el proyecto de inyección de vapor en el yacimiento del río Kern se cuenta entre los mayores del mundo en su género. Una variante de ese tipo de extracción por vapor se ha aplicado a los depósitos de arena bituminosa en Alberta, demasiado profundos para la explotación superficial.

Otro de los procesos térmicos ensayados se basa en la ignición de una parte de los hidrocarburos del depósito, que se encienden con un calentador a la vez que se bombea aire en el pozo para sostener la combustión. El fuego genera calor y dióxido de carbono (CO_2), factores ambos que disminuyen la viscosidad del crudo; gran parte del CO_2 permanece enterrado y favorece la expulsión del crudo. Al propio tiempo, el fuego descompone las moléculas de mayor tamaño y peso del crudo, lo que también facilita su movilidad. Se controla el paso de aire para limitar el crudo incendiado y evitar la emisión de contaminantes al medio.

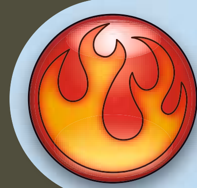
Un método más corriente consiste en la inyección de gases, como CO_2 o nitrógeno, a presión elevada. Tales gases restauran o mantienen la presión interna del depósito; además, se mezclan con el crudo, lo que reduce su viscosidad y las fuerzas que bloquean la expulsión del mismo. Desde el decenio de los setenta, se aplica a este fin en EE.UU. el CO_2 de origen volcánico o de los gases de escape de las centrales térmicas. El proceso se utiliza en unos 100 proyectos en curso, con redes de tuberías que totalizan más de 2500 kilómetros.

La experiencia acumulada en la inyección de dióxido de carbono ha abierto el camino para la captura y el almacenamiento de ese indeseado subproducto de las centrales térmicas, lo que podría reducir radicalmente la emisión a la atmósfera de dicho gas y, en cambio, mantenerlo enterrado durante cientos de años. El primer proyecto comercial de captura y almacenamiento de carbono se ejecuta desde 1996 en el campo de Sleipner, frente a las costas de Noruega: almacena un millón de toneladas métricas de CO_2 por año. Una cantidad reducida, si se tiene en cuenta que la actividad humana emite por sí sola cada año a la atmósfera gases de invernadero equivalentes a 50.000 millones de toneladas de dióxido de carbono. Con todo, el éxito de esta instalación sirve para demostrar la validez del concepto.

Es curioso, sin embargo, que uno de los mayores problemas en la utilización del CO_2 para la extracción de petróleo sea su escasez. Capturar el gas emitido por las chimeneas de las centrales o los volcanes no es nada barato,

EXTRACCION TERCIARIA

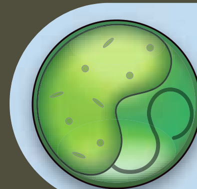
Tras finalizar las fases primaria y secundaria, es posible aligerar el crudo restante merced a métodos más agresivos, algunos todavía en experimentación, para que pueda afluir a los pozos. Dado el alto coste de estos procesos, tan encarnizada batalla por acrecentar la extracción se libra sólo cuando los precios de reventa son suficientemente elevados.



INCENDIARIOS
La quema de una parte del depósito (que requiere la inyección de aire en el subsuelo) eleva el índice de extracción de tres maneras: primera, el calor producido fluidifica el crudo; segunda, la combustión genera óxido de carbono, que expulsa crudo al exterior; tercera, el fuego descompone las moléculas de mayor tamaño y peso del crudo, aumentando su movilidad.



QUIMICOS
La inyección de surfactantes ayuda al crudo a desprenderse de la roca y a fluir más fácilmente. Las capas surfactantes encierran el crudo en gotitas (como el jabón cuando arrastra las sustancias grasas de una superficie). Una variante consiste en inyectar compuestos que generen los materiales "jabonosos" a partir de componentes del mismo crudo.



BIOLOGICOS
Se está experimentando la inyección de bacterias (junto con nutrientes y, en ciertos casos, oxígeno) que proliferan en la interfaz entre el crudo y la roca, lo que facilita la liberación del crudo. Se dejan crecer las bacterias unos cuantos días antes de reanudar la extracción. En un futuro, los microorganismos transgénicos podrían digerir parte del crudo más viscoso y hacerlo así más ligero.

JEN CHRISTIANSEN

LAS PREDICCIONES sobre la futura producción mundial de petróleo varían en un margen muy amplio. Algunos han utilizado el modelo propuesto por el geólogo King Hubbert para predecir una curva acampanada cuya cresta rondaba el año 2002 (*púrpura*) o, más recientemente, el 2015, y después caía inexorablemente. Otros más optimistas, como el Gobierno de EE.UU. (*verde*), tuvieron en cuenta las expectativas de encontrar nuevos yacimientos y la presión técnica por apurar las extracciones. La plena explotación de otras fuentes como arenas y esquistos bituminosos podría sostener el crecimiento de la curva cinco decenios más (*rojo*).

¿CUANTO PETROLEO QUEDA?
Predicciones de la producción mundial (millones de barriles de crudo al día)

120
90
60
30
0
Real
Predicción para 2030 del Departamento de Energía de EE.UU. (2009)
Pleno uso de crudos alternativos (Odell, 2004)
Predicción de "cenit del petróleo" para 2015 (Al Husseini, 2005)
Predicción de Campbell y Laherrère (1998)
2000
Hoy
2020
2040
2060
2080
2100

LAS ARENAS BITUMINOSAS figuran entre las posibles fuentes alternativas de crudo que más abundan. Su explotación, sin embargo, consume mucha energía y puede tener graves efectos sobre el entorno, entre ellos la producción de grandes cantidades de aguas residuales.

y recurrir a fuentes de menor tamaño, como los coches y la mayoría de las plantas industriales, resulta prohibitivo. Otro obstáculo es el transporte, demasiado costoso si los campos petrolíferos se hallan en zonas remotas.

Más recientes son los métodos de extracción basados en procesos químicos. Ciertas sustancias son miscibles con el crudo retenido y disminuyen su viscosidad, de tal manera que puede afluir al pozo. Todas ellas actúan según el mismo principio, a la manera de las moléculas de jabón, que atrapan sustancias grasas y eliminan la suciedad. El proceso químico de mayor éxito aumenta también la viscosidad del agua subterránea; ello permite que ésta impulse el crudo hacia los pozos sin tener que pasar primero por ellos. En el campo petrolífero de Daqing, en China, se atribuye a este proceso la extracción adicional de un 10 por ciento del crudo del depósito desde mitad de los años noventa. En otra versión del proceso, una solución cáustica genera los materiales "jabonosos" a partir de componentes presentes en el crudo, lo cual limita el coste global.

La extracción potenciada por bacterias se halla todavía en mantillas: se han acometido experimentos en EE.UU., China y otros países. Los técnicos bombean al depósito enormes cantidades de microorganismos especializados, junto con nutrientes y, en ciertos casos, oxígeno. Los microorganismos proliferan en la interfaz entre el crudo y la roca, favoreciendo la liberación del crudo. La ingeniería genética abre la posibilidad de modificar las bacterias y otros microorganismos para aumentar su eficacia en cuanto a favorecer la extracción del crudo.

Ninguna de esas avanzadas técnicas de extracción se distingue por un coste bajo. Pero hay algunas (sobre todo la asistida por CO_2 si en las cercanías se dispone de una fuente de gas accesible) que ya resultan económicas cuando el precio del crudo se mantiene por encima de 30 dólares el barril; la mayoría de ellas, incluidas las de extracción química, se tornan económicas en torno a los 50 dólares el barril.

Hallazgos futuros

"El petróleo fácil" toca a su fin, probablemente porque fue el primero en descubrirse y utilizar-

LA HUELLA DE CARBONO que deja la quema de un galón de combustible depende de múltiples factores, entre ellos el modo de extracción y procesamiento de la materia prima. La extracción de crudo viscoso mediante la inyección subterránea de vapor requiere más energía que el bombeo del "petróleo fácil", por lo que emite más dióxido de carbono a la atmósfera. Sucede igual con la extracción de crudo a partir de arenas bituminosas. Pero la conversión de carbón en combustible diésel conlleva, de lejos, las mayores emisiones.

EMISIONES DE CO_2 en kilogramos por galón (3,785 litros) de gasolina o por cantidad equivalente de otro combustible:

Combustible	kg CO_2
CRUDO DE EXTRACCION PRIMARIA (Alaska)	10,37
CRUDO POR INYECCION DE VAPOR (Kern River)	12,2
ARENAS BITUMINOSAS A PARTIR DE INYECCION DE VAPOR	12,81
DIESEL OBTENIDO DE CARBON	23,15
ETANOL OBTENIDO DE MAIZ	10,35
DIESEL OBTENIDO DE LA SOJA	5,98

JEN CHRISTIANSEN; FUENTES PARA EL GRAFICO SUPERIOR: "WHY CARBON FUELS WILL DOMINATE THE 21ST CENTURY'S GLOBAL ENERGY ECONOMY", POR PETER R. ODELL, MULTI-SCIENCE PUBLISHING, 2004 (*curva roja*); DEPARTAMENTO DE ENERGIA DE EE.UU., INFORME #DOE/EIA-0484, 2009 (*curva verde*); AL HUSSEINI, BASADO EN UNA ENTREVISTA CON ASPO-USA EN 2005 (*curva azul*); BOLETIN N.º 90 DE LA ASSOCIATION FOR THE STUDY OF PEAK OIL AND GAS (ASPO), COMPILADO POR C. J. CAMPBELL, JUNIO DE 2008 (*curva púrpura*); FUENTES PARA EL GRAFICO INFERIOR: "TRANSPORTATION IN A CLIMATE-CONSTRAINED WORLD" POR ANDREAS SCHÄFER Y COL., MIT PRESS, 2009; "COMPARISON OF NORTH AMERICAN AND IMPORTED CRUDE OIL LIFECYCLE GHG EMISSIONS", POR JEFF ROSENFELD, JENNIFER PONT Y KAREN LAW, EN *TIAX LLC REPORT*, 6 DE JULIO, 2009; "ENVIRONMENTAL, ECONOMIC AND ENERGETIC COSTS AND BENEFITS OF BIODIESEL AND ETHANOL BIOFUELS", POR JASON HILL, ERIK NELSON, DAVID TILMAN, STEPHEN POLASKY Y DOUGLAS TIFFANY EN *PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES USA*, VOL. 103, N.º 30; 25 DE JULIO, 2006; LARA SOLT *CORBIS* (*fotografía*)

¿Habrá cenit o no?

Numerosos observadores se inquietan por las futuras existencias de petróleo y la posibilidad de que el incesante crecimiento de la producción global esté llegando a su fin. El autor se confiesa escéptico. Aquí expone sus argumentos.

Usted ha afirmado en varias ocasiones que la alarma actual sobre un inminente "cenit del petróleo" es excesiva. ¿No vale más prevenir que curar?

LEONARDO MAUGERI: Es absurdo predecir un cenit de la producción mundial porque ello exigiría conocer el volumen total de petróleo que yace bajo tierra. Nadie lo sabe realmente; ni siquiera en orden de magnitud. Mientras tanto, lo peor de este pánico recurrente es que induce a los políticos occidentales a intentar controlar las regiones productoras de crudo.

Sin embargo, quienes advierten del cenit apuntan a la reciente inestabilidad del precio del crudo (desde un máximo de 147 dólares el barril en julio de 2008 bajó a 32 dólares en diciembre y luego ha remontado hasta 70 dólares) como señal de que nos estamos aproximando al "pico".

L.M.: Si todos creyéramos que el petróleo se estaba agotando, el precio subiría continuamente en vez de fluctuar. Y dado que el precio del crudo es la referencia para los precios de todas las fuentes de energía, la inseguridad nos afecta a todos. ¡Fíjese en lo que ha sucedido a las inversiones en energías renovables desde finales de 2008!

De hecho, se han aplazado grandes proyectos, como el plan del magnate petrolero T. Boone Pickens de instalar un parque eólico en Texas. Entonces, ¿por qué oscilan los precios?

L.M.: En mi opinión, la capacidad de reserva prevista —o su ausencia— es la que gobierna los ciclos de precios del petróleo. El problema es que no podemos cambiar de la noche a la mañana las dimensiones de la capacidad de reserva.

¿Qué se podría hacer para estabilizar los precios?

L.M.: En la reunión de ministros de energía del G8 del pasado mayo, mi compañía, Eni, propuso establecer una Agencia Mundial de la Energía con el mandato de reducir la volatilidad de los precios del crudo. Su cometido principal sería proporcionar datos completos y transparentes sobre el mercado petrolero y gestionar, por un lado, un fondo de estabilización global para evitar el derrumbe de los precios y, por otro, un mercado de la capacidad no aprovechada para impedir subidas estratosféricas.

Desde una perspectiva ambiental, ¿son buenos o malos los altos precios del petróleo?

L.M.: El mundo necesita un petróleo que no sea demasiado caro ni demasiado barato. En las condiciones actuales, un precio ideal estaría entre 60 y 70 dólares el barril. Por encima de 70, se tornarían rentables los métodos poco eficientes de producción de biocombustibles (conversión de maíz en etanol por ejemplo); la producción de biocombustible tendería entonces a desplazar la agricultura global, con efectos devastadores sobre los más necesitados del planeta. Por debajo de 50 o 60 dólares, los aspectos ecológicos se dejarían a un lado y se esfumarían los proyectos de energías renovables.

se como combustible. Muchas de las cuencas petrolíferas más extensas y productivas se están aproximando a su fecha de "vencimiento técnico": el momento en que las técnicas tradicionales dejan de ser eficaces. Entre estas cuencas destacan los yacimientos del golfo Pérsico, México, Venezuela y Rusia, que comenzaron a producir crudo de petróleo por las décadas de los treinta, cuarenta y cincuenta. Para que estos campos sigan produciendo en el futuro, habrá que recurrir a nuevas técnicas.

Pero el petróleo "fácil" no lo era tanto cuando se descubrió. Del mismo modo, el petróleo hoy difícil de extraer se tornará fácil mañana, gracias al refinamiento de la técnica. En la industria petrolera, las innovaciones técnicas siempre han sido fruto de procesos largos y elaborados. La perforación horizontal se ensayó por primera vez en los años treinta y varios de los métodos de extracción más avanzados se conocen ya al menos desde los años cincuenta. Sin embargo, el crudo ha sido casi siempre tan abundante que su precio no ha justificado innovaciones espectaculares y costosas. Se acerca, no obstante, una época en la que se adoptarán nuevas técnicas con mayor diligencia.

La tendencia a aumentar los índices de extracción puede verse frenada por la presente oleada de nacionalización de los recursos. En los primeros años setenta, las grandes compañías petroleras controlaban el 80 por ciento de las reservas mundiales de crudo; hoy, en cambio, más del 90 por ciento del petróleo (estándar) está bajo el control directo de los países productores, a través de sus petroleras nacionales. El dudoso futuro de la demanda de petróleo hace que algunos de esos países se resistan a invertir en técnicas modernas y en prospección, sobre todo porque las inversiones dedicadas a estos fines distraen recursos de los programas de desarrollo económico y social.

Con todo, me atrevo a predecir que hacia 2030 será extraíble más del 50 por ciento del petróleo detectado hasta entonces. Además, habrá crecido notablemente el volumen de crudo detectado y aumentará la producción de otros combustibles, como las pizarras bituminosas. De ese modo, el total de las reservas recuperables variará entre 4,5 y 5 billones de barriles. Una fracción notable de las "nuevas reservas" no procederá del hallazgo de nuevos yacimientos, sino de una renovada capacidad para explotar mejor los medios ya disponibles.

Con toda seguridad, para el 2030 habremos consumido entre otros 650.000 y 700.000 millones de barriles de nuestras reservas, en total 1,6 billones de barriles gastados del volumen de reservas (de 4,5 a 5 billones) antes señalado. Pese a todo, si mis estimaciones son correctas, habrá petróleo para el resto del siglo XXI. El verdadero problema reside en cómo utilizar esa reserva sin derrocharla con hábitos de consumo inaceptables y, por encima de todo, sin poner en peligro el entorno y el clima de nuestro planeta.

Bibliografía complementaria

THE ECONOMICS OF PETROLEUM SUPPLY. Morris A. Adelman. MIT Press, 1993.

PETROLEUM PROVINCES OF THE TWENTY-FIRST CENTURY. Marlan W. Downey, Jack C. Threet y William A. Morgan. American Association of Petroleum Geologists, 2002.

THE AGE OF OIL: THE MYTHOLOGY, HISTORY, AND FUTURE OF THE MOST CONTROVERSIAL RESOURCE. Leonardo Maugeri. Praeger Publishers, 2006.

OIL IU THE TWENTY-FIRST CENTURY: ISSUES, CHALLENGES, AND OPPORTUNITIES. Preparado por Robert Mabro. Oxford University Press, 2006.

BIOCARBURANTES CELULOSICOS. George W. Huber y Bruce E. Dale en *Investigación y Ciencia*, n.º 396, págs. 44-51; septiembre 2009.

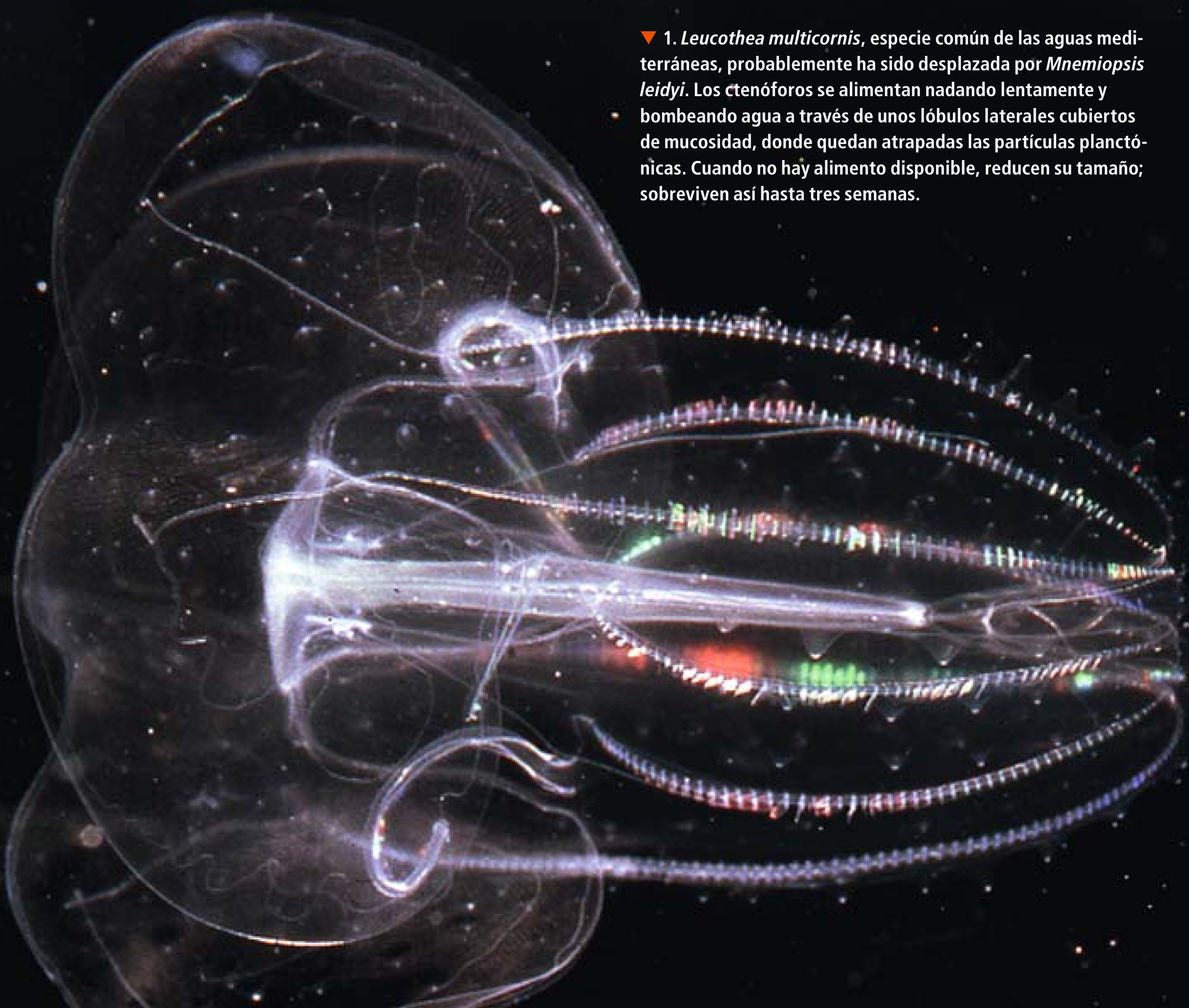
Historia de una invasión

Dacha Atienza y Verónica Fuentes

En los últimos decenios, el deterioro de los ecosistemas marinos debido al calentamiento global, la sobrepesca y la contaminación ha resultado en alteraciones a escala global y regional. En ocasiones, esos cambios favorecen más a especies alóctonas que a las autóctonas; las primeras se consideran entonces especies invasoras. Uno de los casos más impresionantes de este fenómeno corresponde a los ctenóforos.

Mnemiopsis leidyi es una especie originaria de las costas atlánticas de América (Caribe y Estados Unidos). En los años ochenta del siglo pasado fue introducida en el mar Negro, donde, junto con la contaminación, contribuyó al colapso de numerosas pesquerías. Su introducción podría haber sido accidental, a través de las aguas de lastre de los buques cargueros, o intencionada, para controlar las poblaciones de medusa (*Aurelia aurita*) que habían proliferado.

A finales de los años ochenta comenzó la invasión de *M. leidyi* en el mar de Azov, mar de Mármara, mar Caspio y el norte del Egeo, desde donde se produjo su pronta dispersión por las costas de Siria y Turquía; en 2006 se la encontró en el mar del Norte y el Báltico. Hoy, la distribución de *M. leidyi* se ha ampliado a toda la cuenca Mediterránea: durante 2009 se ha confirmado su presencia en la costa norte del Adriático, el mar de Liguria, la costa de Israel y el Mediterráneo Noroccidental.



1. *Leucothea multicornis*, especie común de las aguas mediterráneas, probablemente ha sido desplazada por *Mnemiopsis leidyi*. Los ctenóforos se alimentan nadando lentamente y bombeando agua a través de unos lóbulos laterales cubiertos de mucosidad, donde quedan atrapadas las partículas planctónicas. Cuando no hay alimento disponible, reducen su tamaño; sobreviven así hasta tres semanas.

CLOT CARRE



2. Los individuos de *M. leidyi* son hermafroditas. Su reproducción es muy rápida; comienza a los 13 días de vida. Cada individuo pone entre 3000 y 7000 huevos diariamente.



3. El impacto de *M. leidyi* sobre las poblaciones de larvas de peces, en particular sobre algunas especies comerciales como la anchoa, puede ser notable. Su morfología y comportamiento facilitan la depredación.

4. Distribución de *M. leidyi* en la cuenca mediterránea durante 2009. La presencia de esta especie ha sido confirmada por diversas redes de avistamiento. Los primeros registros se realizaron en Italia, luego en la costa de Israel; a principios de julio se detectó en el Mediterráneo Noroccidental.



EDUARDO OBIS (*arriba y centro*)

La crisis de la gestión pública en Estados Unidos

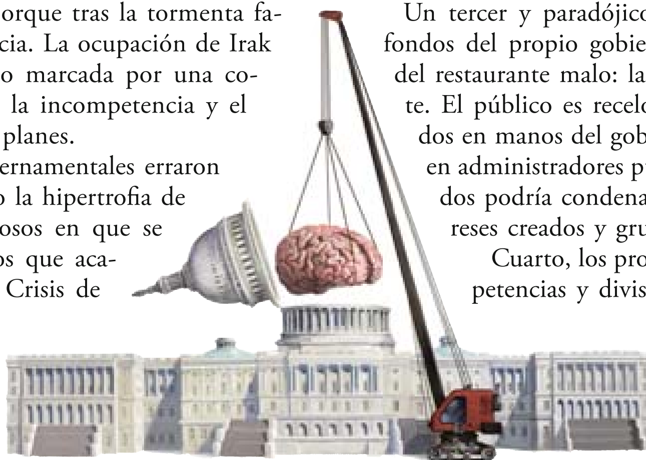
Es imprescindible revisar los sistemas con que se ejecutan allí las políticas nacionales

Jeffrey D. Sachs

La crisis de la gobernación en EE.UU. va más allá de las divisiones políticas e ideologías; afecta también a la puesta en práctica de las políticas ya adoptadas. No sólo están los estadounidenses divididos por lo que deba hacerse con la asistencia sanitaria, el déficit presupuestario, los mercados financieros, el cambio climático y otros asuntos, sino que el gobierno no está siendo efectivo en la ejecución de las políticas que se deciden. Los sistemas de gestión que engarzan el gobierno, las empresas y la sociedad civil necesitan un arreglo urgente.

Los fallos del sistema son notorios y numerosos. Los ataques del 11-S se podrían haber impedido si el FBI y las agencias de inteligencia hubieran cooperado de forma más eficiente a principios de 2001, cuando percibieron indicios de un posible ataque terrorista. La enorme devastación y la pérdida de vidas humanas producidas por el huracán Katrina fueron posibles sólo porque durante decenios se ignoró, entre otras recomendaciones, la de reforzar los diques que protegían Nueva Orleáns, y sólo porque tras la tormenta falló la ayuda federal de emergencia. La ocupación de Irak por parte de EE.UU. ha estado marcada por una corrupción escandalosa y masiva, la incompetencia y el fracaso en la realización de los planes.

Las agencias reguladoras gubernamentales erraron completamente al pasar por alto la hipertrofia de instrumentos financieros peligrosos en que se basaron los insensatos préstamos que acabarían por conducir a la Gran Crisis de 2008. Los sistemas de adquisición de material militar son tan deficientes, según algunos expertos, que actualmente ponen en peligro la seguridad nacional: EE.UU. compra armamento innecesario, defectuoso y a un precio excesivo. El oneroso sistema nacional de salud costea un uso exagerado de ciertas tecnologías mientras deja sin fondos a medidas públicas sanitarias muy eficaces y baratas. Aunque lleva casi un decenio pensándoselo, el gobierno no ha construido y ensayado ni una central eléctrica de carbón que capte y almacene el dióxido de carbono, pese a que este proyecto es vital para evolucionar hacia una economía baja en carbono. La lista, lamentablemente, no acaba aquí.



Necesitamos un mejor conocimiento científico de estos omnipresentes fallos sistémicos. Los gobiernos de otras naciones gestionan con mayor éxito las inversiones en infraestructura, los sistemas de salud pública y los recursos ambientales, y parece que con mayor flexibilidad, menos corrupción, menor coste y mejores resultados. EE.UU. debería aprender de ellos.

Hay varios factores en juego. Uno ha sido la inadecuada privatización de las funciones reguladoras del sector público. Las empresas de Wall Street tienen excesiva influencia en las autoridades reguladoras del gobierno, lo que propicia la libertad de actuaciones peligrosas. Empresas privadas de seguros y proveedores de servicios sanitarios bloquean las medidas que restringirían el uso desbocado de técnicas costosas. Suministradores privados de material militar promueven la adquisición de armamento innecesario.

Un segundo factor ha sido el fracaso planificador del gobierno central. Una característica sorprendente de los recientes debates sobre el cambio climático, la generación de energía, la rehabilitación de las infraestructuras y la reforma del sistema sanitario es la falta de propuestas gubernamentales detalladas y con miras de futuro. La administración de Obama ha establecido principios generales —muy admirables— pero con demasiada frecuencia sin objetivos claros ni estrategias operativas para cumplirlos. Se ha reemplazado la planificación por cabildeos y acuerdos de trastienda en el Congreso, opacos casi para el público.

Un tercer y paradójico factor es la crónica escasez de fondos del propio gobierno. Suena como el viejo chiste del restaurante malo: la comida era pésima e insuficiente. El público es receloso a la hora de poner más fondos en manos del gobierno; aun así, si no invierte más en administradores públicos cualificados, Estados Unidos podría condenarse a estar en las manos de intereses creados y grupos de presión.

Cuarto, los problemas actuales trascienden competencias y divisiones institucionales. En asistencia sanitaria y energía, por ejemplo, el sector privado posee las tecnologías clave, pero sólo el sector público puede financiar el I+D, regular las prácticas sostenibles y asegurar el acceso de los pobres a los recursos y servicios. La salud pública debe dirigirse a la curación, la nutrición, los sistemas alimentarios y un ambiente más seguro. Los sistemas energéticos deben respetar tanto las limitaciones ecológicas como las económicas. Sin embargo, los organismos gubernamentales no están pensados para actuar según enfoques integrados.

No basta ya con apaños: es necesario revisar los medios básicos de gestión pública para recuperar el control de los procesos reguladores, reducir el influjo de los grupos de presión, restablecer la planificación, dotar de fondos adecuados a gestores cualificados y orientar los sistemas de gestión hacia la adopción de estrategias basadas en una visión de conjunto.

Jeffrey D. Sachs es director del Instituto de la Tierra de la Universidad de Columbia.

MATT COLLINS



El jamón curado

Desde la dieta del cerdo hasta las condiciones de secado, numerosos factores determinan la calidad del jamón

Fidel Toldrá Vilardell

El proceso de curado del jamón se remonta a tiempos en que se utilizaba como técnica de conservación para la provisión de alimentos en momentos de escasez. Conocido por los egipcios, entró en España con la romanización. El método de curación se ha ido transmitiendo de padres a hijos durante generaciones. Hoy en día, las técnicas de refrigeración han mejorado el proceso, dando lugar a productos más regulares, sabrosos y exquisitos.

España es el primer productor mundial de jamón curado: más de 44 millones de piezas (jamones y paletas) al año. Sobre todo en el sudoeste, destaca el jamón ibérico; aunque supone sólo el 8 por ciento de la producción total, goza de una gran fama nacional e internacional por su aroma y sabor. Procede del cerdo ibérico adulto, que, en un sistema de explotación extensiva, recibe una alimentación natural basada en los productos de la dehesa (bellotas y hierbas); se denomina también jamón de bellota. Otras calidades son las de recebo (combinación de alimentación natural y pienso) y cebo (sólo pienso).

Existen cuatro Denominaciones de Origen Protegidas (DOP) de jamón ibérico: Guijuelo, Dehesa de Extremadura, Valle de los Pedroches y Jabugo. Para jamones de cerdo blanco (el cerdo común que se cría en todo el país) existe la DOP Jamón de Teruel, la Especialidad Tradicional Garantizada (ETG) Jamón Serrano y la Indicación Geográfica Protegida (IGP) de jamones de Trévelez. También se produce jamón en Italia (DOP jamón de Parma, DOP jamón de San Daniele), Portugal (DOP Presunto de Barrancos), Francia (IGP jamón de Bayona), EE.UU. (jamón estilo Country, en general ahumado), China (jamón Jinghua), Bélgica, etcétera. Los países del norte de Europa también producen jamón, pero suele ser ahumado, poco curado.

FIDEL TOLDRA (*arriba*); © *iStockphoto*/SUSANNA FIERAMOSCA NARANJO (*abajo*)



El proceso de curado parece simple; consta de pocas etapas y, en apariencia, sencillas. Sin embargo, el proceso entraña una gran complejidad, pues se cuentan por centenares las reacciones químicas y enzimáticas que afectan a la textura, el color, el aroma y el sabor del jamón. La primera etapa consiste en la recepción de la materia prima, que se clasifica en lotes según el peso y la acidez (*p*H). A continuación, se desangran los jamones, con el fin de eliminar cualquier rastro de sangre remanente en el interior de la pieza; se aplica por frotación en la superficie una sal curante, mezcla de sal y nitrificante como el nitrato potásico (presalado). Se cubren luego los jamones con sal para que ésta se incorpore lentamente (salado). Transcurridos entre 10 y 12 días, según el tamaño de la pieza, los jamones se cepillan para eliminar los restos de sal de la superficie y pasan a la etapa siguiente (postsalado), cuyo objetivo es que la sal y el nitrificante se difundan a través de la pieza y lleguen a las zonas internas del jamón; este proceso dura de 1,5 a 2 meses.

Alcanzado este punto, los jamones ya están preparados para el curado. Este puede ser natural (en las condiciones de temperatura y humedad de la sierra donde se ubica el secadero) o artificial (en secaderos modernos, con control de temperatura, humedad y ventilación). El curado puede variar en cuanto a temperatura y duración. Los buenos jamones suelen haberse curado a temperaturas suaves y durante largo tiempo; los más económicos, a temperaturas superiores durante períodos más cortos. Cuando se alcanza el grado de secado deseado, el jamón se recubre con manteca de uso alimentario para evitar que continúe secándose y se ubica en bodegas, donde termina el curado y completa el desarrollo del aroma y sabor. En general, cuanto más se alarga la curación, mejor es la calidad del jamón. Así, un buen jamón ibérico puede experimentar una curación de 2 a 3 años; un jamón de cerdo blanco, de entre 6 y 12 meses.

Durante la etapa de curado se desarrolla en el jamón una intensa actividad enzimática. Las proteasas dan lugar a aminoácidos que contribuyen al sabor; las lipasas están implicadas en la generación de ácidos grasos responsables del aroma. Se trata de enzimas muy estables; la mayoría se mantienen activas durante todo el proceso. De ahí que el tiempo de curación sea tan importante: favorece la acumulación de los productos de las reacciones enzimáticas y, por tanto, potencia el aroma y el sabor. Se consigue una calidad óptima cuando el color del corte transversal del jamón es uniforme y aparece un veteado de grasa ramificado.

Amén de ser uno de nuestros productos tradicionales más arraigados, el jamón tiene gran demanda en mercados exteriores, donde no existe la costumbre de consumirlo en forma de pieza entera. El desarrollo de nuevas técnicas de loncheado y envasado están favoreciendo el aumento de las exportaciones.

Fidel Toldrá Vilardell, Instituto de Agroquímica y Tecnología de Alimentos (CSIC), Burjassot (Valencia)

Las ciudades perdidas del Amazonas

La selva tropical del Amazonas no es tan salvaje como parece

Michael J. Heckenberger



CONCEPTOS BASICOS

- Para la mayoría, la selva amazónica es el ejemplo típico de naturaleza virgen sometida a una lenta destrucción con la intervención gradual del hombre.
- En realidad, lo que parece prístino ha sido modelado también por los seres humanos. En algunas zonas, la selva es bosque secundario, que se instaló cuando los pueblos indígenas fueron aniquilados en sus encuentros con los europeos. El autor y sus colaboradores han encontrado extensas ruinas precolombinas. Las comunidades tenían una estructura sibisemejante o fractal; casas, poblados y grupos de poblados estaban organizados de manera parecida.
- La historia del Amazonas es mucho más interesante de lo que generalmente se creía. El reto ambiental no consiste sólo en conservar las tierras vírgenes, sino también en recuperar las técnicas de agricultura y silvicultura sostenibles de los antepasados de los actuales habitantes de la región.

Cuando Brasil estableció el Parque Indígena de Xingú, en 1961, la reserva se hallaba lejos de la civilización moderna, instalada en lo más recóndito de las extensiones meridionales de la vasta selva amazónica. Cuando en 1992 fui a vivir por primera vez con los kuikuros, kuikurus, o cuicuros, uno de los principales grupos indígenas de la reserva, los límites del parque se hallaban todavía escondidos en gran parte por el denso bosque y eran poco más que líneas en un mapa. En la actualidad el parque está rodeado por un mosaico de campos de labor y tiene los límites marcados a menudo por una pared de árboles. Para los extraños, ese es el verde portal que les lleva del presente, el mundo moderno y dinámico de los campos de soja, los sistemas de regadío y los camiones de cinco ejes, al pasado, el mundo intemporal de la naturaleza y la sociedad primigenias.

Mucho antes de ocupar un lugar central en la crisis ambiental del mundo, de convertirse en la verde e inmensa joya de la ecología global, el Amazonas le resultaba ya singular a la imaginación de los occidentales. La simple mención de su nombre conjura imágenes de junglas rezumantes de humedad, abrumadas por la vegetación; de animales salvajes misteriosos, de variados colores, a veces peligrosos; de redes fluviales infinitamente intrincadas; de tribus de la Edad de Piedra. Para los occidentales, los pueblos amazónicos son sociedades absolutamente sencillas, pequeños grupos que se las arreglan con lo que la naturaleza proporciona, poseedores de un conocimiento complejo del mundo natural, pero carentes de los sellos distintivos de la civilización: un gobierno central, los establecimientos urbanos y la producción económica más allá de la subsistencia. En 1690, John Locke aseveró famosamente: "En el principio, todo el mundo era América". Más de tres siglos después, el Amazonas todavía cautiva la imaginación popular: es la naturaleza en su estado más puro, el hogar de pueblos indígenas que conservan —como escribía Sean Woods, director de la revista *Rolling Stone*, en octubre de 2007— "un modo de vida que no ha cambiado desde el amanecer de los tiempos".

Las apariencias pueden ser engañosas. Ocultos bajo el dosel arbóreo hay restos de una compleja sociedad precolombina. Con la ayuda de los kuikuros, mis excavaciones han descubierto una red de ciudades, pueblos y caminos



LUIGI MARINI

ancestrales que sostuvieron una población quizá veinte veces la actual. Enormes fajas de bosque han crecido sobre los antiguos poblados, sobre los jardines, campos y huertos, que cayeron en desuso cuando las epidemias traídas por los exploradores y colonos europeos diezmaron los pueblos aborígenes. La rica biodiversidad de la región refleja intervenciones humanas en el pasado. Al desarrollar una mezcla de usos del territorio, de técnicas de enriquecimiento del suelo y largos ciclos de rotación agrícola, los antepasados de los kuikuros prosperaron en el Amazonas, a pesar de sus suelos por naturaleza infértiles. Sus logros pueden ser útiles en los esfuerzos por reconciliar los objetivos ambientales y de desarrollo de esa región y de otras partes de la Amazonía.

"Pueblos naturales"

El más famoso de los buscadores de civilizaciones perdidas en el Amazonas meridional fue Percy Harrison Fawcett, aventurero inglés. Registró "junglas no cartografiadas" en busca de una ciudad antigua, la Atlántida de la Amazonía, repleta de pirámides de piedra, calles pavimentadas con guijarros y escritura

KUHIKUGU, que los arqueólogos conocen como localidad X11, es la mayor aldea precolombina descubierta hasta ahora en la región de Xingú, en la Amazonía. Albergaba a mil personas o más, y funcionaba como centro de una red de aldeas menores. En el recuadro "Ciudades precolombinas" se encontrará la clave de esta ilustración.

alfabética. Sus relatos inspiraron *El mundo perdido*, de Conan Doyle, y quizá los filmes de *Indiana Jones*. El reciente y cautivador libro de David Grann, *La ciudad perdida de Z*, sigue los pasos de la ruta de Fawcett antes de su desaparición en el Xingú en 1925.

En realidad, cinco expediciones alemanas habían visitado ya las tierras y las gentes xingús (o xinguanas). En 1894, Karl von Steinen publicó *Unter den Naturvölkern Zentral Brasiliens* ("Entre los pueblos naturales del centro de Brasil"), que describía las primeras expediciones; se convirtió inmediatamente en un clásico de la antropología. El libro estableció el que, a lo largo del siglo xx, sería el tono del estudio de los pueblos amazónicos: grupos pequeños y aislados que vivían en un delicado equilibrio con la selva tropical; eran "pueblos naturales". Antropólogos posteriores consideraron que el ambiente selvático era uniformemente hostil para la agricultura; la pobre fertilidad del suelo parecía impedir grandes asentamientos y poblaciones regionales densas. Según este razonamiento, el Amazonas del pasado tuvo que ser muy parecido al Amazonas de tiempos recientes.

Pero esa teoría empezó a desmoronarse en los años setenta del siglo pasado, cuando los especialistas volvieron a consultar los relatos que habían escrito los primeros europeos que conocieron la región: no se referían a pequeñas tribus, sino a poblaciones densas. Tal como ha descrito Charles Mann en su libro *1491*, América estaba densamente poblada en la víspera de los desembarcos europeos, y la Amazonía no era una excepción. Gaspar de Carvajal, misionero que escribió la crónica de la primera expedición española río abajo, observó



Tierra de leyenda

Las investigaciones y excavaciones arqueológicas han revelado que había partes de la Amazonía densamente pobladas en la víspera de la exploración y colonización europeas. El equipo del autor se centra en la zona habitada por el pueblo kuikuro, en la cabecera del río Xingú, en el estado brasileño de Mato Grosso. Fue aquí donde el famoso explorador inglés Percy Harrison Fawcett desapareció hace más de ochenta años; estaba buscando ciudades perdidas.

GEORGE RETSECK

Los kuikuros

Los kuikuros participaron de forma activa en el trabajo de campo del autor y coautores de los artículos científicos que resultaron del mismo. La suya es una de las pocas sociedades amazónicas que, a pesar de siglos de despoblamiento, mantienen toda la extensión de su cultura (lenguaje, rituales, arte) y siguen practicando la agricultura intensiva (principalmente de mandioca), la piscicultura, la producción hortícola y la gestión forestal.



◀ 1. Una mujer kuikura pesca con un cesto en un estanque adyacente a la localidad arqueológica X13 (Heulugihïtï).

▼ 2. Flautistas y bailarines conmemoran al malogrado Apoena Meirelles, un antropólogo brasileño que fue asesinado, durante una ceremonia funeraria kuarap en agosto de 2005.





▲ 3. Los kuikuros conservan un estilo de vida anterior a 1492. El registro arqueológico muestra que organizan su economía y sus poblados igual que sus antepasados.



▲ 4. Una aldea xinguana, con una población de dos centenares de personas, consta de grandes casas con techumbre de paja dispuestas alrededor de una plaza central.

CORTESIA DE MICHAEL J. HECKENBERGER *(mujer pescando)*; ERALDO PERES *AP Photo (bailarines)*; GREGG NEWTON *Corbis (niño)*; RICKEY ROGERS *Reuters/Corbis (vista aérea)*

ciudades fortificadas, caminos anchos y bien cuidados, y muchos individuos. Escribió que el 25 de junio de 1542

> "[...] pasamos por entre unas islas que pensamos que estuvieran despobladas, pero después que nos hallamos en medio de ellas fueron tantas las poblaciones, que en las dichas islas parecían y vimos, que nos pesó; y como nos vieran, salieron a nosotros al río sobre doscientas piraguas, que cada una trae veinte y treinta indios, y de ellas cuarenta, y destas hubo muchas: venían muy lucidas con diversas divisas y traían muchas trompetas y atambores, y órganos que tañen con la boca, y arrabeles que tienen a tres cuerdas [...] en tierra era cosa maravillosa de ver los escuadrones que estaban en los pueblos, tañendo y bailando todos con unas palmas en las manos, mostrando muy gran alegría en ver que nos pasábamos de sus pueblos."

La investigación arqueológica en varias zonas a lo largo del río Amazonas, como la isla Marajó, en su desembocadura, y en diversas localidades aledañas a las ciudades modernas de Santarém y Manaus, ha confirmado esos relatos. Tales sociedades interaccionaban a través de vastos sistemas comerciales. Se sabe menos acerca de las periferias meridionales del Amazonas, pero trabajos recientes en Llanos de Mojos, en las tierras bajas de Bolivia y en el estado brasileño de Acre sugieren que allí hubo también sociedades complejas. En 1720, el explorador brasileño António Pires de Campos describió un paisaje densamente poblado en la cabecera del río Tapajoz, al oeste del Xingú:

> "Estas gentes existen en número tan grande, que no es posible contar sus poblados o aldeas, y muchas veces, a lo largo de un día de marcha, se pasa junto a diez o doce aldeas, y en cada una de ellas hay de diez a treinta casas, y entre dichas casas las hay que tienen entre treinta y cuarenta pasos de ancho... incluso los caminos los hacen muy rectos y anchos, y los mantienen tan limpios que en ellos no se encuentra ni una hoja caída..."

Una antigua ciudad amurallada

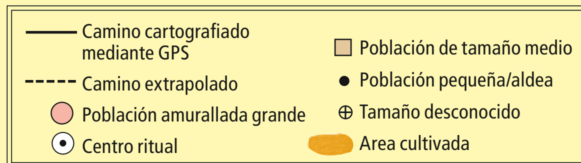
Cuando a principios de los noventa del siglo pasado me aventuré a estudiar sobre el terreno la historia profunda del Xingú, las ciudades perdidas eran lo que más alejado estaba de mi pensamiento. Había leído a Steinen pero apenas si había oído hablar de Fawcett. Aunque gran parte de la enorme cuenca del Amazonas era *terra incognita* desde el punto de vista arqueológico, era improbable que los etnógrafos, y mucho menos los xinguanos, hubieran pasado por alto un gran centro

El autor

Michael J. Heckenberger ha llevado a cabo proyectos arqueológicos en la región del Xingú y en otras partes de la Amazonía brasileña desde 1992, últimamente como profesor de la Universidad de Florida. Su trabajo se centra en la organización social y política y en la ecología histórica de las últimas sociedades prehistóricas complejas de la región. Estudia también los cambios de las sociedades indígenas tras la colonización europea, no sólo en Brasil, sino también en el nordeste de Sudamérica, el Caribe y el nordeste de Norteamérica.

Ciudades precolombinas

Los estudios sobre el terreno muestran que los antepasados de los kuikuros transformaron cientos de kilómetros cuadrados de bosque en campos de labor. Aunque los poblados eran pequeños según criterios modernos, se hallaban estrechamente conectados y formaban aglomeraciones ordenadas; cada una funcionaba como una unidad política. Los asentamientos tenían una organización fractal: aglomeraciones, aldeas y casas se hallaban todas organizadas a lo largo del mismo eje, en la dirección aproximada este-oeste.





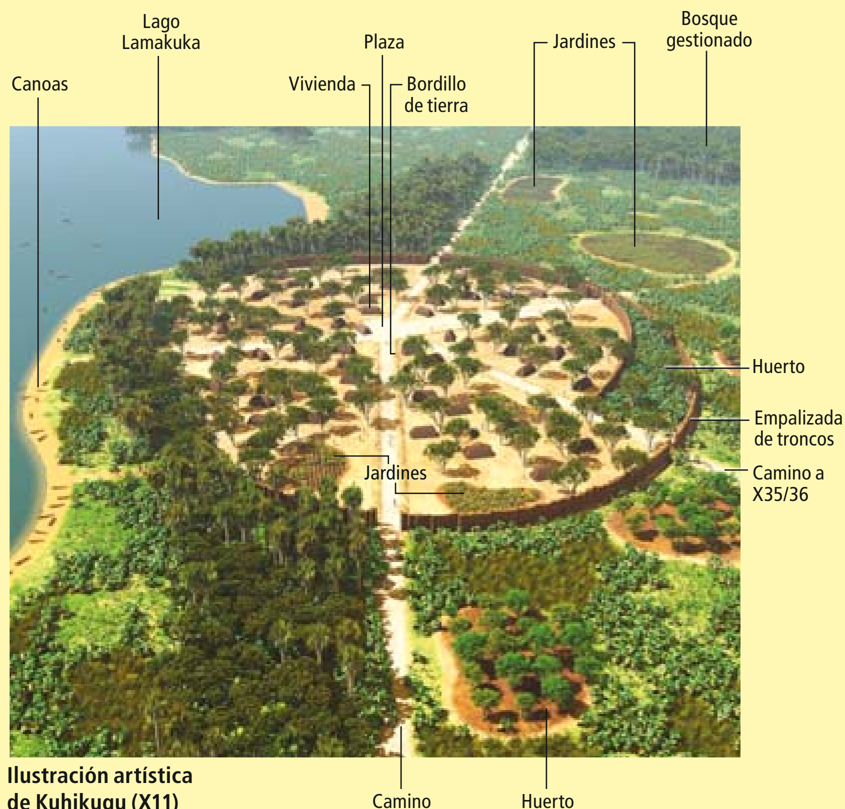


Ilustración artística de Kuhikugu (X11)

monolítico que sobrepasase las copas de los bosques tropicales.

No obstante, por todas partes había señales de algo más elaborado que los poblados actuales. Robert Carneiro, del Museo Americano de Historia Natural de Nueva York, que había vivido entre los kuikuros en los años cincuenta del siglo pasado, defendía que su estilo de vida asentado y su economía productiva agrícola y pesquera podían mantener comunidades de entre 1000 y 2000 personas, varias veces la población contemporánea, que es de unos pocos centenares. Citaba asimismo una prueba de que, efectivamente, así había sido: una localidad prehistórica (designada "X11" en nuestro estudio arqueológico) rodeada de extensos fosos. Los hermanos Villas Boas, indigenistas brasileños que fueron nominados al premio Nobel de la Paz por su participación en la creación del parque de Xingú, habían informado de fortificaciones de ese tipo cerca de muchas aldeas.

En enero de 1993, poco después de mi llegada a la aldea kuikura, el principal jefe hereditario o "cacique", Afukaka, me llevó a uno de los fosos de un lugar (X6) que ellos llaman Nokugu, por el espíritu del jaguar, que creen que vive allí. De camino vimos a unos lugareños que construían una enorme encañizada en el río Angahuku, que ya estaba muy crecido debido a las lluvias estacionales. El foso, que recorría unos dos kilómetros, tenía de dos a tres metros de profundidad y más de diez metros de ancho. Aunque esperaba encontrar un paisaje arqueológico distinto del actual, la escala de esas comunidades antiguas y sus construcciones me sorprendieron. Los ayudantes de investigación kuikuros y yo pasamos los meses siguientes cartografiando el foso y otras fortificaciones de esa localidad, que medía 45 hectáreas.

Desde aquel día, nuestro equipo ha estudiado otras numerosas localidades de la zona y establecido más de 30 kilómetros de transectos —trayectos lineales a lo largo de los cuales se realiza el estudio— a través de la selva para cartografiar, examinar y excavar yacimientos. Muchos kuikuros ayudaron de una manera u otra, y algunos adquirieron una buena formación en arqueología.

A finales de 1993, Afukaka y yo volvimos a Nokugu y pude explicarle qué había des-

GEORGE RETSECK (*mapa*); LUIGI MARINI (*vista aérea*)

cubierto. Seguimos el perfil del foso exterior del lugar y nos detuvimos en un puente de tierra, por donde un camino principal que habíamos desenterrado pasaba sobre el foso. Le señalé el antiguo camino de tierra, recto como una flecha, que tenía entre 10 y 20 metros de ancho y conducía a otra localidad antigua, Heulugihïtï (X13), a unos cinco kilómetros de distancia. Cruzamos el puente y entramos en Nokugu.

El camino, definido por bajos bordillos de tierra, se ensanchaba hasta los 40 metros: era amplio como una autopista. Un par de cientos de metros más adelante pasamos sobre el foso interior y nos detuvimos para contemplar nuestra zanja de excavación, recién terminada, en la que habíamos encontrado el cimiento en forma de embudo para una empalizada de troncos de árboles. Afukaka me contó una historia de aldeas con empalizadas e incursiones en el pasado remoto de su pueblo.

A medida que nos adentrábamos en la antigua ciudad, pasamos junto al bosque, matorral y zonas despejadas que ahora cubren la localidad: la huella de actividades del pasado. Llegamos a un claro herbáceo de altas palmeras, que señalaba la antigua plaza. Fui girando lentamente sobre mis talones y reseguí con el dedo el borde perfectamente circular de la plaza, marcado por un montículo de un metro de alto. Las palmeras, le expliqué, habían colonizado la plaza hacía siglos, gracias al mantillo de los jardines de las áreas domésticas.

Tras dejar la plaza para explorar las inmediaciones, llegamos a grandes estercoleros de residuos, que se parecían mucho al que había detrás de la propia casa de Afukaka. Estaban llenos de marmitas rotas que, advirtió, eran exactamente como las que sus esposas utilizaban para procesar y cocinar la mandioca, hasta en el más mínimo detalle. En una visita posterior, mientras excavábamos una casa precolombina, el jefe se inclinó sobre el centro de cocina, tomó un fragmento grande de cerámica y corroboró mi impresión de que la vida cotidiana de la sociedad antigua era muy parecida a la actual: "¡Estás en lo cierto!", me dijo. "Mira, un soporte de marmita", un *undagi*, como lo llaman los kuikuros, utilizado para cocer mandioca.

Por estas conexiones son las localidades xinguanas tan fascinantes. Cuentan entre los pocos poblados precolombinos amazónicos donde las pruebas arqueológicas pueden relacionarse directamente con las costumbres actuales. En otras partes, o la cultura indígena fue aniquilada o el registro arqueológico es fragmentario. El antiguo pueblo amurallado que le mostré a Afukaka se parecía mucho a su aldea actual, con su plaza central y sus caminos radiales, sólo que era diez veces mayor.

De la casa a la organización política

"Palaciega" no es la primera palabra que se le viene a la mente a quien ha de describir una casa de postes y techumbre de paja. La mayoría de los occidentales pensaría más bien en "cho-

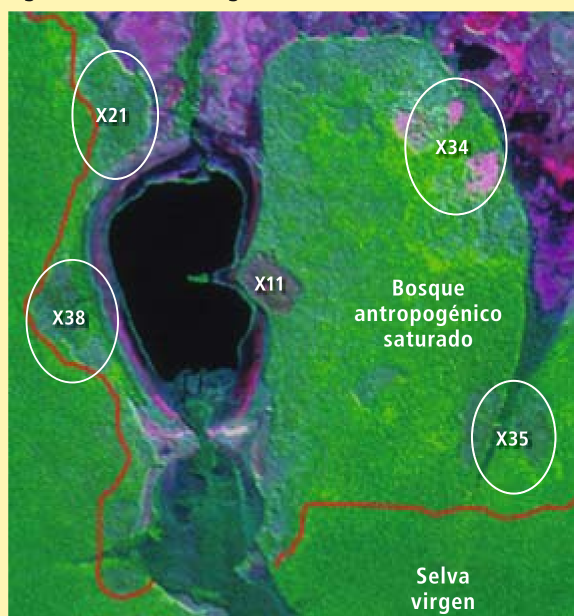
Al ritmo actual, la selva de la Amazonía meridional se hallará reducida al 20 por ciento de su tamaño original dentro de diez años. Los pueblos indígenas serán los gestores de la biodiversidad que reste.

CORTESIA DEL SERVICIO GEOLOGICO DE EE.UU./CENTRO DE VUELOS ESPACIALES GODDARD/LANDSAT 7

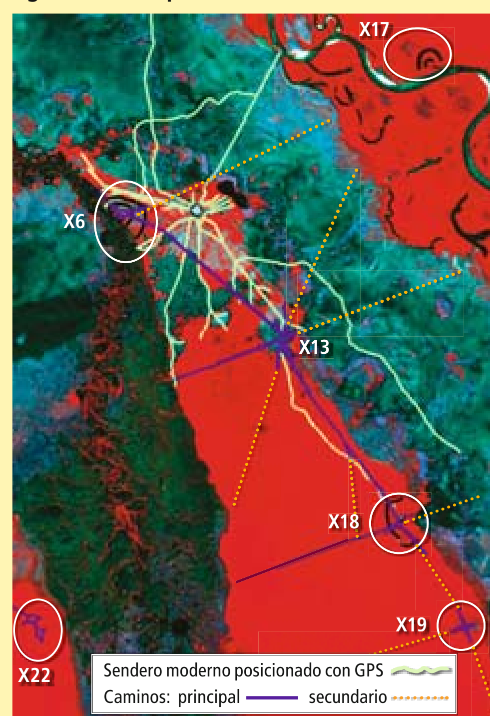
Bajo el dosel

Las imágenes del satélite Landsat, en colores falsos que representan las diferentes bandas del infrarrojo, muestran una textura moteada; indican que el bosque ha sido modelado por el hombre, sobre todo en los poblados antiguos y su alrededor, identificado por el autor y su equipo en estudios sobre el terreno. La selva de las zonas no modificadas presenta un aspecto más uniforme. El estudio de las propiedades del suelo y la vegetación confirma que antaño se cultivó extensamente la región.

Aglomeración Kuhikugu



Aglomeración Ipatse



HISTORIA DEL XINGU

Las dataciones mediante carbono radiactivo indican que el pueblo xinguano ha vivido en el Alto Xingú durante al menos 1500 años.

Siglo VI. Los antepasados de los habitantes actuales llegaron desde el oeste.

Siglo XIII. Grupos de xinguanos se organizaron en aglomeraciones ordenadas, con una población regional que, se estima, fue de 30.000 a 50.000 personas.

1542. El conquistador español Francisco de Orellana dirigió la primera expedición europea que descendió por el curso del Amazonas, según cuenta la crónica de Gaspar de Carvajal.

Siglo XVIII. Las incursiones esclavistas diezmaron todavía más al pueblo xinguano.

1884. El antropólogo alemán Karl von den Steinen visitó el Xingú y calculó una población de 3500 personas.

Años cincuenta del siglo pasado. Orlando, Cláudio y Leonardo Villas Boas dirigieron una campaña para fundar la reserva del Xingú. La población xinguana era de unas 500 personas.

za". Pero la casa que los kuikuros construían para el jefe cuando llegué en 1993 era bien amplia: mucho más de 1000 metros cuadrados. Es difícil imaginar que una casa construida como un gigantesco cesto invertido, sin piedra, mortero o clavos, pueda ser mayor. Ni siquiera la casa media de los xinguanos, de unos 250 metros cuadrados, puede considerarse pequeña.

La casa del jefe destaca no sólo por el tamaño, sino, sobre todo, por su ubicación, en el extremo meridional de la plaza circular central. Cuando se entra en la aldea por el camino de entrada formal, las familias de alto rango viven a la derecha (sur) y a la izquierda (norte). La disposición reproduce, a una escala mayor, el plan de las casas, cuyo ocupante de mayor rango cuelga su hamaca a la derecha a lo largo del eje mayor del edificio. El camino de entrada tiene una dirección aproximada este-oeste; la hamaca del jefe está orientada en su casa en la misma dirección. Cuando un jefe muere, descansa en una hamaca con la cabeza orientada hacia el oeste.

Ese cálculo corporal básico se aplica a todas las escalas, desde las casas hasta la cuenca entera del Alto Xingú. Las antiguas ciudades se distribuyen por la región y están interconectadas por un enrejado de caminos alineados de forma precisa. Cuando llegué por primera vez a la zona, tardé semanas en cartografiar los fosos, plazas y caminos, pues aplicábamos las técnicas arqueológicas estándar. Desde 2002, empezamos a utilizar GPS precisos, lo que nos permitió cartografiar en cuestión de días las fortificaciones principales. Hemos encontrado un grado impresionante de integración regional. La planificación del paisaje parece cabalmente predeterminada, con un lugar específico para cada elemento. Pero se basa en los mismos principios de la aldea actual: los caminos principales tienen la dirección este-oeste, los caminos secundarios irradian hacia el norte y el sur, y los caminos menores proliferan en otras direcciones.

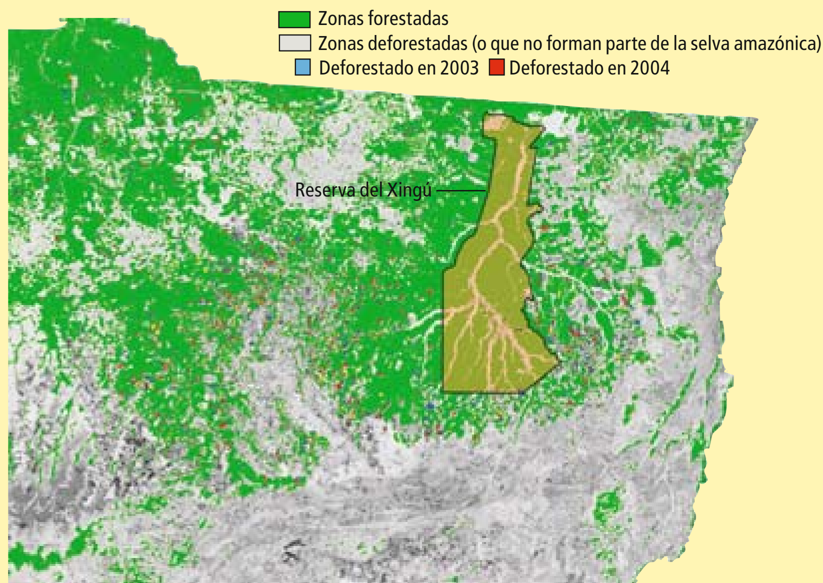
Cartografiamos dos aglomeraciones jerárquicas de ciudades y aldeas en nuestra área de estudio (*véase el mapa del recuadro* "Ciudades precolombinas"). Cada una de ellas consiste en un centro ceremonial principal y varias ciudades satélite grandes con orientaciones precisas respecto al centro. Es probable que estas ciudades albergaran mil o más habitantes. Hay aldeas menores más alejadas del centro. La aglomeración septentrional está centrada en X13, que no era tanto una ciudad cuanto un centro ritual, una especie de descampado para actos públicos. Dos grandes poblados cercados se encuentran equidistantes al norte y al sur de X13, y dos ciudades amuralladas de tamaño medio equidistan al nordeste y sudoeste. La aglomeración meridional, algo diferente, se halla centrada en X11, a la vez una sede ritual y una ciudad, alrededor de la cual hay poblados de tamaño medio y pequeño.

Cada aglomeración abarcaba más de 250 kilómetros cuadrados, de los que aproximadamente la quinta parte correspondían al área

CORTESIA DE MICHAEL J. HECKENBERGER (*mapa*); RICKEY ROGERS *Reuters/Corbis* (*vista aérea*)

Una isla de árboles

Las tierras indígenas se han convertido en la principal barrera contra la deforestación en muchas partes del Amazonas. La reserva del Xingú se hallaba antaño situada en lo profundo de la selva tropical, pero en la actualidad está rodeada por los paisajes desbrozados de los ranchos ganaderos y los campos de soja. Para que los xinguanos consigan alimentos para su población creciente, ¿habrán también de talar la selva? El trabajo del autor sugiere que no. El modelo de uso del suelo de sus antepasados, basado en pequeñas aldeas y largos ciclos agrícolas de rotación, puede sustentar una población bastante grande.



LA DEFORESTACION en el Mato Grosso es una de las más rápidas de Brasil: en 2004, cinco hectáreas por minuto.



central construida. (Madrid, contando el monte del Pardo, mide 600 kilómetros cuadrados y Barcelona, sin los demás municipios de su área metropolitana, 100.) En la actualidad, ha crecido la vegetación sobre la mayor parte del paisaje antiguo, pero los bosques del área central tienen concentraciones distintivas de determinadas plantas, animales, suelos y artefactos arqueológicos (abunda la cerámica). El uso del suelo fue más intensivo en el pasado, pero los restos sugieren que muchas prácticas eran similares a las de los kuikuros: parcelas de mandioca, huertos de pequis o nueces souari (árboles frutales) y campos de hierba *sapé*, el material preferido para techar las casas.

El ambiente rural era un paisaje a retazos, con bosques secundarios que invadían las áreas agrícolas en barbecho. Los humedales, ahora obstruidos por las palmas burití, el cultivo industrial más importante, conservan indicios diversos de piscicultura: estanques artificiales, calzadas elevadas y bases de encañizadas. A extramuros del área central había un cinturón verde poblado más ralamente; entre las aglomeraciones crecía incluso selva virgen cerrada. También esta selva tenía sus usos: se explotaban animales, plantas medicinales y determinados árboles. Se la consideraba la morada de espíritus del bosque.

Las áreas que se hallan en los lugares residenciales y en sus alrededores están marcadas por tierra oscura, que los kuikuros llaman *egepe*, un suelo muy fértil que se ha enriquecido con los desechos domésticos y con actividades especializadas de manejo del suelo, como la quema controlada de la cubierta vegetal. Los humanos han alterado los suelos en todo el mundo; los han vuelto más oscuros, más adecuados en sus proporciones de arcillas, limos y arenas, y más ricos en determinadas sustancias químicas. En la Amazonía, esos cambios son particularmente importantes para la agricultura, habida cuenta de la pobreza del suelo natural. En el Xingú la tierra oscura es menos abundante que en otras partes porque la población depende allí principalmente de la mandioca y de los huertos, que no requieren suelos de gran fertilidad.

La identificación de grandes poblados amurallados en una zona que tiene una superficie parecida a la de la Comunidad Valenciana sugiere que en todo el Alto Xingú había al menos 15 aglomeraciones. Pero la mayor parte de la región no está estudiada, de manera que el número real pudo haber sido mucho mayor. La datación mediante radiocarbono de nuestros lugares excavados sugiere que los antepasados de los xinguanos se establecieron en la región, procedentes con mucha probabilidad del oeste, y empezaron a moldear bosques y humedales según sus propósitos hace unos 1500 años o antes. En los siglos anteriores al descubrimiento europeo de América, las comunidades se reconfiguraron en aglomeraciones jerárquicas. Los registros se remontan sólo a 1884; por consiguiente, los patrones de instalación sobre el terreno constituyen nuestra única manera de estimar la población precolombina. La escala de las aglomeraciones sugiere una población regional muchas veces mayor que la actual: entre 30.000 y 50.000 personas.

Ciudades jardín del Amazonas

Hace un siglo, Ebenezer Howard proponía en *Garden Cities of To-morrow* ("Las ciudades jardín del mañana") un modelo sostenible de crecimiento urbano de baja densidad. Este precursor del movimiento verde imaginaba ciudades dispuestas en retículo como una alternativa a un mundo industrial que se llenaba de ciudades con edificios de muchos pisos. Diez ciudades con decenas de miles de personas, sugería, podrían tener la misma capacidad funcional y administrativa que una única megaciudad.

Los xinguanos de la antigüedad construyeron un sistema así, un estilo de urbanismo o protourbanismo plano y verde: una ciudad jardín incipiente. Quizá Percy Fawcett estuvo en el lugar adecuado, pero se equivocó al buscar ciudades de piedra. Lo que les faltaba a los centros en tamaño y en estructuras complejas lo compensaban mediante el número y la integración. Si Howard los hubiera conocido, podría haber dedicado un pasaje a las "ciudades jardín del ayer". La idea común de la ciudad como un retículo denso de edificios de albañilería se remonta a las civilizaciones antiguas de oasis del desierto, tales como Mesopotamia, pero no era propia de otros muchos ambientes. No sólo las selvas tropicales de la Amazonía, sino también los paisajes de bosques templados de gran parte de la Europa medieval estaban tachonados de ciudades y aldeas de tamaño similar a las que había en el Xingú.

Percatarse del alcance de esas observaciones reviste interés ahora que la Amazonía meridional se vuelve a desarrollar, esta vez por parte de la civilización occidental. El bosque de transición de la Amazonía meridional se está convirtiendo en tierras agrícolas y pastos. Al ritmo al que hoy decrece, en la próxima década se habrá reducido hasta el 20 por ciento de su tamaño original. Gran parte de lo que quede estará en reservas, como la del Xingú, donde los pueblos indígenas serán los gestores de la biodiversidad que reste. En ellas, salvar las selvas tropicales y proteger el patrimonio cultural indígena es, en muchos aspectos, exactamente lo mismo.

Bibliografía complementaria

AMAZONIA 1492: PRISTINE FOREST OR CULTURAL PARKLAND? Michael J. Heckenberger et al. en *Science*, vol. 301, págs. 1710-1714; 19 septiembre 2003.

THE ECOLOGY OF POWER: CULTURE, PLACE AND PERSONHOOD IN THE SOUTHERN AMAZON, AD 1000-2000. Michael J. Heckenberger. Routledge, 2005.

1491: NEW REVELATIONS OF THE AMERICAS BEFORE COLUMBUS. Charles C. Mann. Vintage, 2006.

PRE-COLUMBIAN URBANISM, ANTHROPOGENIC LANDSCAPES, AND THE FUTURE OF THE AMAZON. Michael J. Heckenberger et al. en *Science*, vol. 321, págs. 1214-1217; 29 de agosto, 2008.

THE LOST CITY OF Z: A TALE OF DEADLY OBSESSION IN THE AMAZON. David Grann. Doubleday, 2009.

El ribosoma y la traducción genética

El alto grado de conservación del ribosoma en todos los organismos indica que su temprana aparición fue crucial para el desarrollo de la vida. Además de traducir la información genética en proteínas, participa en la regulación de la expresión génica

Daniel A. Colón Ramos y Antón Vila Sanjurjo

CONCEPTOS BASICOS

- El ribosoma es el orgánulo celular que traduce el código genético en instrucciones funcionales. El proceso ocurre en todos los organismos.
- Su estructura y su función no han variado mucho desde su aparición en la faz de la Tierra, en un período anterior al surgimiento de las primeras células.
- Sin embargo, posee también una versatilidad bioquímica que le permite adaptar su función a las circunstancias con que se enfrentan los organismos.

Todos los seres vivos se integran en uno u otro de los tres grandes reinos: Eubacteria, Arquea y Eucaria. El primer reino comprende organismos unicelulares minúsculos; por ejemplo, las bacterias *Escherichia coli* y *Salmonella typhimurium*, y todos los patógenos humanos de naturaleza bacteriana. El reino Arquea se compone también de organismos unicelulares de tamaño equiparable al de las bacterias, pero muy diferentes de ellas desde el punto de vista bioquímico. Acostumbran medrar en ambientes con temperaturas y condiciones químicas extremas. El resto de los organismos se encuentran en el reino Eucaria, que contiene a los seres vivos que nos son más familiares: las plantas, los animales y los hongos.

Si nos centramos en Eucaria, a primera vista parecería que la agrupación de organismos tan diferentes dentro de un mismo reino se hubiese realizado de forma caprichosa. ¿Cómo es posible que una levadura (subreino Fungi) o incluso un pino (subreino Plantae) estén bajo la misma categoría que los seres humanos (subreino Animalia)? Pese a la divergencia física entre dichos organismos, las células que los componen muestran semejanzas asombrosas. En efecto, todas las células de organismos eucariotas (los pertenecientes a Eucaria) tienen orgánulos, con funciones muy especializadas, de los que carecen las células de los otros dos reinos. Además, todas las células eucariotas poseen un núcleo celular, del que carecen las células de Eubacteria y Arquea. En el núcleo se encuentra la información genética, en forma de ADN. Esta compartimentalización del material genético no existe en los reinos Eubacteria y Arquea.

Si bien a nivel celular podemos encontrar semejanzas entre organismos a primera vista tan dispares como los de los tres subreinos eucariotas, a nivel molecular las semejanzas van más allá del reino Eucaria. El estrecho parecido molecular entre los tres reinos refleja un mismo origen evolutivo de los seres vivos. Esa realidad, que lleva a su más extrema consecuencia la teoría de Darwin sobre la evolución, se ha descubierto gracias, en buena medida, al estudio del ribosoma, una máquina biológica molecular que hallamos en todos los seres vivos y que tiene por función "traducir" el material genético en instrucciones para la célula [*véase* "Ribointerruptores", por Jeffrey E. Barrick y Ronald R. Breaker; Investigación y Ciencia, marzo de 2007]. Entender la función del ribosoma es entender la naturaleza del material genético, su raíz evolutiva y el origen de la vida tal y como la conocemos.

A primera vista, los dos ácidos nucleicos, el ADN y el ARN, podrían parecer casi iguales. De hecho, la única diferencia entre ellos es la presencia de un átomo extra de oxígeno en la estructura química del ARN. Esta pequeña diferencia da lugar a propiedades bioquímicas muy distintas, que dictan y limitan la función biológica de cada una de estas moléculas. El ADN, que se organiza en largas cadenas de doble hélice, es muy estable químicamente; constituye, pues, un compuesto ideal para el almacenamiento de información genética, razón por la cual lo encontramos en todas las células actuales de los tres reinos de la vida.

No parece, sin embargo, que el ADN haya sido la molécula primigenia que dio lugar a la vida. Servir de material genético sería sólo una de las características de la molécula primigenia; la otra sería la de poseer capacidad de autorreplicación, lo cual requiere la habilidad de poder dirigir reacciones químicas de autoensamblaje. La estabilidad química del ADN, que tan bien le ha servido en su función de almacenamiento de información en las células actuales, comporta una seria limitación para su capacidad catalítica.

El ARN y su "mundo"

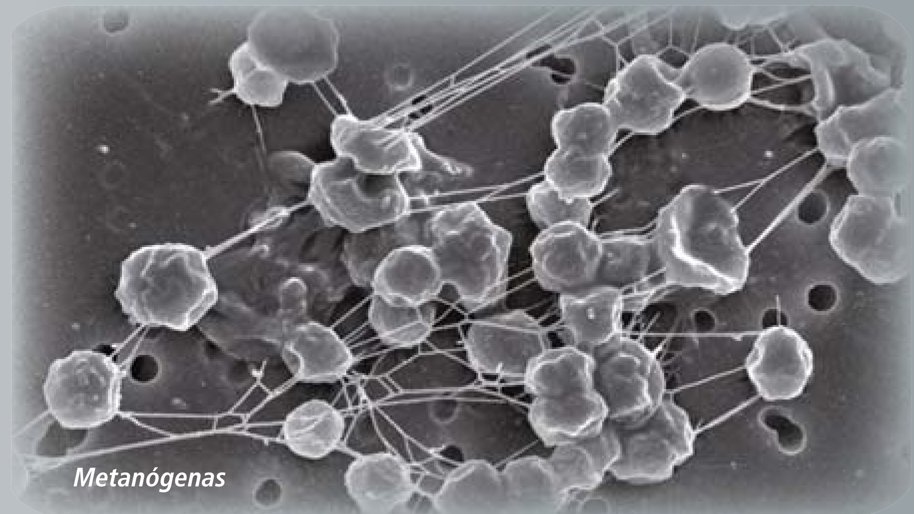
El ARN también puede almacenar información genética, pero su estructura química lo hace más inestable que el ADN. Una propiedad que, sin embargo, le confiere capacidad para dirigir reacciones químicas. Hasta mediados de los ochenta se creía que los únicos polímeros celulares que podían controlar reacciones químicas, es decir, con poder catalítico, eran un grupo de proteínas denominadas enzimas. Fue entonces cuando Thomas Cech y Sidney Altman, de las universidades de Colorado y Yale, observaron que, en algunos organismos, ciertas moléculas de ARN gobernaban reacciones químicas. Se las denominó ribozimas, o enzimas de ARN. El descubrimiento les valió el premio Nobel en 1989 y supuso una revolución en las teorías sobre el origen de la vida, al erigirse el ARN como la molécula primigenia capaz de cumplir la función de almacenamiento y replicación de información genética.

Se creó así la hipótesis del "mundo de ARN", que propone que la transición del

EUBACTERIA



ARQUEA



EUCARIA



1. PESE A LAS ENORMES DIFERENCIAS macroscópicas y microscópicas entre ellos, los seres de los tres reinos de la vida, Arquea, Eubacteria y Eucaria, presentan sorprendentes semejanzas en el nivel molecular. El ribosoma, cuya estructura se ha conservado en muy buena medida a lo largo de miles de millones de años de evolución de la vida, es uno de los más claros ejemplos.

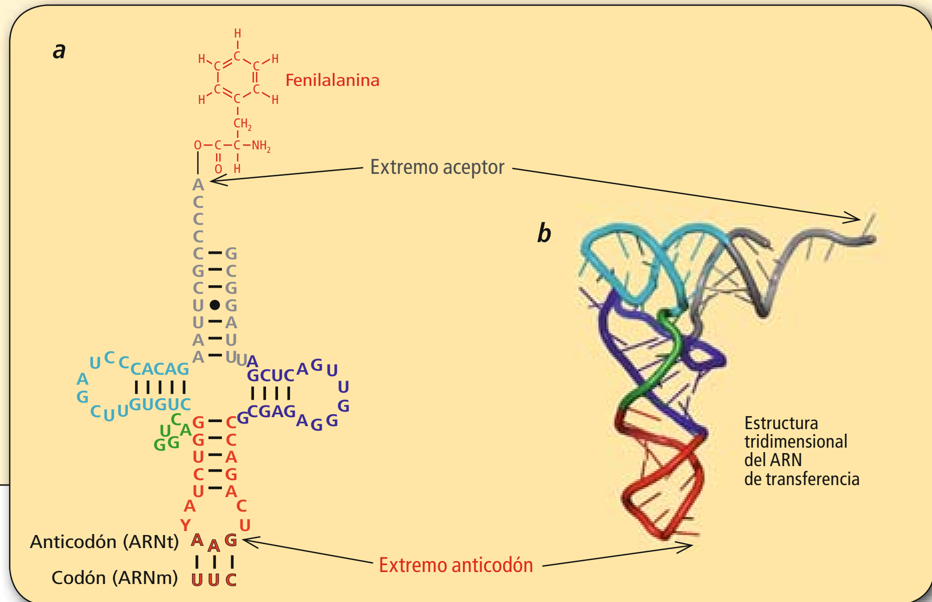
ROCKY MOUNTAIN LABORATORIES, NIAID, NIH (*Salmonella*); MARYLAND ASTROBIOLOGY CONSORTIUM, NASA Y STScI (*metanógenas*); RYAN KITKO, BORG QUEEN Y STEMONITIS/WIKIMEDIA COMMONS (*reino eucaria*)

LA ESTRUCTURA DEL ARN Y LA LECTURA DEL CODIGO GENETICO

El ARN celular no forma largas cadenas de doble hélice como el ADN. Raramente produce cadenas con complementariedad perfecta; es decir, un nucleótido de adenosina (A) de una cadena no siempre se liga a uno de uracilo (U) de la otra, o uno de citosina (C) con uno de guanina (G). Esto no significa que sus bases no tiendan también a emparejarse, ya que las bases del ARN no sólo se emparejan siguiendo la ley de la complementariedad, sino que explotan además otras posibilidades de interacción que el ADN no utiliza.

La doble hélice de ARN se forma a través del emparejamiento de pequeñas regiones complementarias pertenecientes a una misma cadena, como se observa en *a*, correspondiente a un ARN de transferencia (ARNt) que codifica al aminoácido fenilalanina. Nótese la presencia de un emparejamiento de bases inusual G-U, marcado con un punto, y la de una base modificada, wibutosina, representada por Y. (La presencia de bases modificadas es común en los ARNt.)

Los ARNt portan su aminoácido correspondiente en su extremo aceptor. Esto se muestra en *a* por medio de la estructura molecular de la fenilalanina (*en rojo*) unida al último nucleótido del ARNt. Al mismo tiempo, los ARNt se unen por su extremo anticodón a su secuencia de bases complementaria (el codón) en el ARN mensajero (ARNm). En *a* se muestra cómo el ARNt de la fenilalanina "lee" el codón que especifica a este aminoácido, UUC. Tras un primer plegamiento de las cadenas de ARN a través de la formación de zonas discretas de doble hélice, la estructura tridimensional del polímero se complica mediante el establecimiento de otros tipos de interacciones entre sus nucleótidos. Se generan estructuras tridimensionales muy complicadas, como se muestra en *b*.



mundo prebiótico al mundo vivo se realizó por medio de moléculas de ARN con capacidad de autorreplicación. De acuerdo con esa teoría, las proteínas y el ADN surgieron posteriormente al florecimiento del mundo de ARN. Aunque existen multitud de incógnitas con respecto a la hipótesis, se da por cierto que si el primordial mundo de ARN existió, su final sobrevino una vez que el ARN "aprendió" a sintetizar las primeras proteínas. Dada la versatilidad y la poderosa capacidad catalítica de las proteínas, éstas acabarían por reemplazar al ARN en la mayoría de las funciones enzimáticas. Por su parte, el ADN terminó por sustituir al ARN en la tarea de almacenamiento de información.

La evolución del ADN como material genético y de las proteínas como principales agentes catalíticos de la célula no eliminó de la célula al ARN. Muy al contrario: teniendo en cuenta que no hay en los organismos modernos proceso más fundamental que la traducción de la información genética almacenada en el ADN, tarea en la cual el ARN desempeña un papel principal, podríamos decir que el ARN es la molecula central de la vida.

ARNr y traducción genética

El ribosoma es un complejo gigantesco. Contiene normalmente 3 o 4 cadenas de ARN —el ARN ribosómico (ARNr)— y un número variable de proteínas, dependiendo del organismo en cuestión. Ciertos segmentos de la secuencia del ARNr se han conservado a lo largo de la evolución a través de los tres reinos: Eubacteria, Arquea y Eucaria. De la misma manera que un botánico puede mirar los anillos del tronco de un árbol y entender su historia, un biólogo molecular puede comparar las secuencias ribosómicas de distintos organismos y comprender su historia evolutiva. Las secuencias de ARNr constituyen el más detallado archivo existente de la evolución de la vida en la Tierra, de ahí que los tres reinos de la vida se hayan definido a partir de la comparación de estas secuencias. La conservación de los ARNr es tal, que da a entender que todos los ribosomas existentes descienden de un primitivo protorribosoma. Se cree que la aparición del protorribosoma marcó en la evolución el final del "mundo del ARN" y el principio de la célula moderna.

DANIEL A. COLON RAMOS Y ANTON VILA SANJURJO

Los ribosomas constan de dos subunidades desiguales, la subunidad pequeña y la subunidad grande. Las partículas ribosómicas pueden separarse mediante centrifugación, pues sus coeficientes de sedimentación varían de acuerdo con el tamaño y la forma. Se recurre a estos coeficientes para designar a las partículas ribosómicas. Así, al ribosoma más estudiado, el de la enterobacteria *Escherichia coli,* se le denomina 70S (en unidades de sedimentación Svedberg, o S, en honor de Theodor Svedberg) y se compone de una subunidad 30S y otra 50S. La subunidad 30S de *E. coli* está compuesta de un ARNr, con coeficiente de sedimentación 16S y 21 proteínas, mientras que la subunidad 50S contiene 2 ARNr, cuyos coeficientes son 23S y 5S, y alrededor de 30 proteínas. Los ribosomas eucariotas son mayores, 80S, y se componen de una subunidad 40S, otra 60S y alrededor de 80 proteínas.

Aunque todas las secuencias génicas que codifican proteínas se hallan en el ADN genómico, el ribosoma no puede leer directamente el ADN. Por ello, los genes se transcriben primero en ARN mensajeros (ARNm), unidades discretas de ARN que suelen contener la secuencia de un solo gen.

En el código genético, cada uno de los 20 aminoácidos está especificado por un triplete de bases, o codón, en el ARNm. Al existir cuatro nucleótidos (A, C, G y T en el ADN, o A, C, G y U en el ARN), se pueden formar un total de 64 tripletes diferentes. El código genético soluciona esa disparidad entre el número de aminoácidos y tripletes asignando más de un triplete a cada aminoácido (por lo cual se dice que el código es "degenerado"). Tan básico para la vida es este código, que no ha cambiado en millones de años y es casi universal, de modo que un gen humano se puede traducir en la proteína correcta cuando es insertado en una célula de *E. coli*.

En todos los seres vivos, otra molécula de ARN, el ARN de transferencia, o ARNt, lee los codones del ARNm dentro del ribosoma. La lectura del código genético en el ribosoma utiliza el principio de complementariedad por el que se forma la doble hélice del ADN. Adenina, A, se complementa con uracilo, U (reemplazado por timina o T en el ADN), y citosina, C, con guanina, G. Los dos extremos de la molécula del ARNt son fundamentales durante la traducción del código genético. El extremo aceptor del ARNt se une específicamente al aminoácido leído por el ARNt, mientras que el extremo anticodón contiene dos o tres bases complementarias a las del codón o triplete correspondiente a ese aminoácido en el ARNm. De este modo, cada ARNt puede "leer" la secuencia, o codón, que codifica su aminoácido correspondiente. Existe, por lo menos, un ARNt específico para cada aminoácido.

Si los ARNt leen la secuencia específica del ARNm que codifica a su aminoácido correspondiente, ¿para qué se necesita el ribosoma? Por dos razones fundamentales. Primero, el ribosoma asegura que se siga la secuencia de decodificación especificada por el ARNm, de modo que las proteínas se sinteticen correctamente; en segundo lugar, el ribosoma cataliza la reacción de transferencia peptídica entre aminoácidos consecutivos que permite que se polimericen, es decir, que formen las cadenas proteicas. Estas dos funciones se encuentran separadas física y temporalmente.

Así, mientras se traduce el código genético en la subunidad pequeña, el ensamblaje secuencial de los aminoácidos tiene lugar en la subunidad grande. Para asegurar el cabal desarrollo del proceso, el ribosoma dispone de tres sitios (E, P y A) a los que se unen tres moléculas de ARNt (una por cada sitio) y un sitio al que se une el ARNm.

Las actividades fundamentales del ribosoma —la decodificación, la actividad de transferencia peptídica, o peptidil-transferasa, y la translocación— son propiedades intrínsecas del ARN ribosómico. Por esto se considera al ribosoma la mayor de las ribozimas conocidas. A finales de los años sesenta se sospechó ya que la catálisis de la actividad peptidil transferasa dependía por entero del ARN. Desde entonces se acumularon datos bioquímicos que corroboraban dicho supuesto. Sin embargo, la prueba definitiva llegó con la visualización del ribosoma por medio de la cristalografía de rayos X, obra del grupo de Tom Steitz (galardonado por ello con el premio Nobel de química de 2009), de la Universidad de Yale, ratificada más tarde por otros grupos, el nuestro incluido: se mostró que el centro de transferencia peptídica constaba sólo de ARN.

En fecha más reciente, el grupo de Harry Noller, de la Universidad de California en Santa Cruz, uno de los máximos contribuidores al entendimiento del ribosoma, ha probado también que la translocación de los ARNt (su cambio de posición en el ribosoma) es una función en la que se halla íntimamente implicado el centro de transferencia peptídica. Por último, el propio mantenimiento de la complementariedad entre codón y anticodón durante la decodificación está controlado por un grupo de bases del ARNr de la subunidad pequeña, tal y como propuso inicialmente el grupo de Harry Noller y después comprobó el laboratorio de Venki Ramakrishnan (también premiado con el Nobel de química de 2009), de la Universidad de Cambridge, por medio de la cristalografía de rayos X.

Entender la función del ribosoma es entender la naturaleza del material genético, su raíz evolutiva y el origen de la vida.

Regulación de la expresión génica en el nivel de la traducción

1. Todos cometemos errores, el ribosoma también. El carácter de ribozima del ribosoma subraya su papel de molécula de transición entre el mundo de ARN y el mundo de las complejas células actuales. La supervivencia de estas células depende de la expresión, en perfecta coordinación, de una multitud de genes. Existen unos 4500 genes en *E. coli*, unos 6000 en las levaduras y más de 25.000 en el ser humano. La regulación del flujo de información desde el ADN hacia las proteínas se desarrolla en varios niveles; entre otros, la replicación del ADN genómico, la transcripción, el procesamiento de los ARNm y la traducción. La mayor parte del control de ese flujo se produce en la transcripción; sin embargo, existen multitud de procesos cuya regulación ha de ser muy rápida y por ello requieren que el punto de control se halle mucho más cercano al producto final, la proteína.

Un ejemplo de regulación en el nivel de la traducción sería el caso del factor de terminación de la traducción RF2. Este factor, que en *E. coli* se encarga de leer los codones de terminación de la traducción, UAA y UGA, se regula por medio de un mecanismo que induce, de forma controlada, la comisión de errores por parte del ribosoma. Durante la decodificación, el ribosoma distingue los ARNt incorrectos de los correctos, para que sólo estos últimos permanezcan en el sitio de decodificación (sitio A) y puedan usarse en el siguiente paso de la traducción. En condiciones normales, el error es mínimo: un aminoácido equivocado por cada 10.000 lecturas.

Sin embargo, la comisión controlada de errores durante la decodificación puede ser utilizada por ésta para la regulación de la expresión génica, en un proceso llamado recodificación. Como analogía, veamos lo que le ocurre a una misma ristra de letras con diferentes marcos de lectura:

Amor: irás y regresarás,
nunca en la guerra perecerás.

¡A morir! Así regresarás nunca,
en la guerra perecerás.

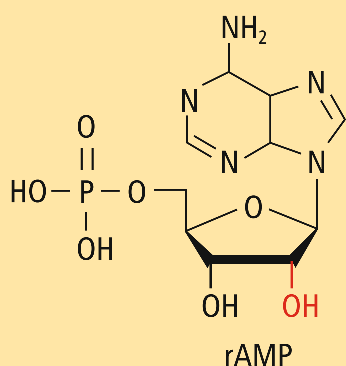
Si bien las letras son las mismas, los dos mensajes difieren entre sí. Del mismo modo, el ribosoma puede leer los ARNm de varias maneras. Cuando los ribosomas se unen al "codón de iniciación", queda establecido el marco de lectura. En el caso de RF2, la síntesis de la proteína completa y activa requiere que el marco de lectura cambie durante la traducción. La regulación de los niveles de RF2 está perfectamente ajustada a la exigencia de la célula, ya que el salto al marco de lectura alternativo depende de la concentración celular de RF2.

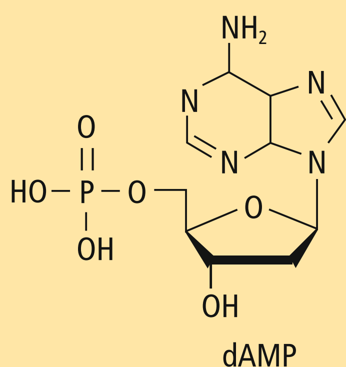
2. Proteínas que se atascan en el ribosoma. Siendo la decodificación y la actividad peptidil-transferasa las funciones principales del ribosoma, no extraña que la célula aproveche la región de la subunidad grande encargada de esta última actividad (el centro peptidil-transferasa) para la regulación de la expresión génica. Nos ofrece un ejemplo la expresión de los genes que codifican las proteínas TnaA y TnaB, encargadas de la degradación del aminoácido triptófano. Esta ruta metabólica permite que las especies bacterianas que la poseen puedan crecer en un medio de cultivo cuya única fuente de carbono es ese aminoácido.

Los genes necesarios para activar esta ruta, *tnaA* y *tnaB,* se agrupan en una unidad de expresión multigénica, el operón, en este caso el operón de la triptofanasa o *tna*. Los distintos genes que componen los operones se transcriben en un único ARNm. El mecanismo de regulación del operón *tna* ha sido elucidado por el grupo de Charles Yanofsky, de la Universidad de Stanford. Para comprender cómo funciona este mecanismo es necesario señalar que en las bacterias la transcripción y la traducción ocurren casi simultáneamente, de modo que el ribosoma sigue físicamente a la ARNpol (ARN polimerasa, la enzima encargada de transcribir el ADN en ARN) a medida que ésta sintetiza el ARNm.

El operón *tna* contiene cerca de su comienzo, y precediendo a *tnaA*, un corto marco de lectura (el espacio entre un codón de iniciación y uno de terminación), *tnaC*, que codifica una proteína de 34 aminoácidos, TnaC. Compete a TnaC permitir que la expresión de los genes importantes del operón, *tnaA* y *tnaB,* responda a los niveles de triptófano, lo cual, como veremos, ocurre sin que la proteína llegue a salir del ribosoma.

La regulación del operón *tna* tiene lugar durante la traducción de este pequeño marco de lectura. En ausencia de triptófano, la iniciación de la transcripción es muy eficiente, pero, como veremos, termina pronto y no alcanza los genes *tnaA* y *tnaB*. En tales condiciones, el ribosoma que sigue a la ARNpol llega al codón de terminación de *tnaC* (UGA) y termina la traducción de la proteína TnaC, que se desprende del ribosoma por la acción de RF2. Entonces, el ribosoma se desensambla del ARNm y este último queda libre para unirse al factor de terminación de la transcripción Rho. Una vez unido, el factor busca a una ARNpol para abortar la transcripción y, la

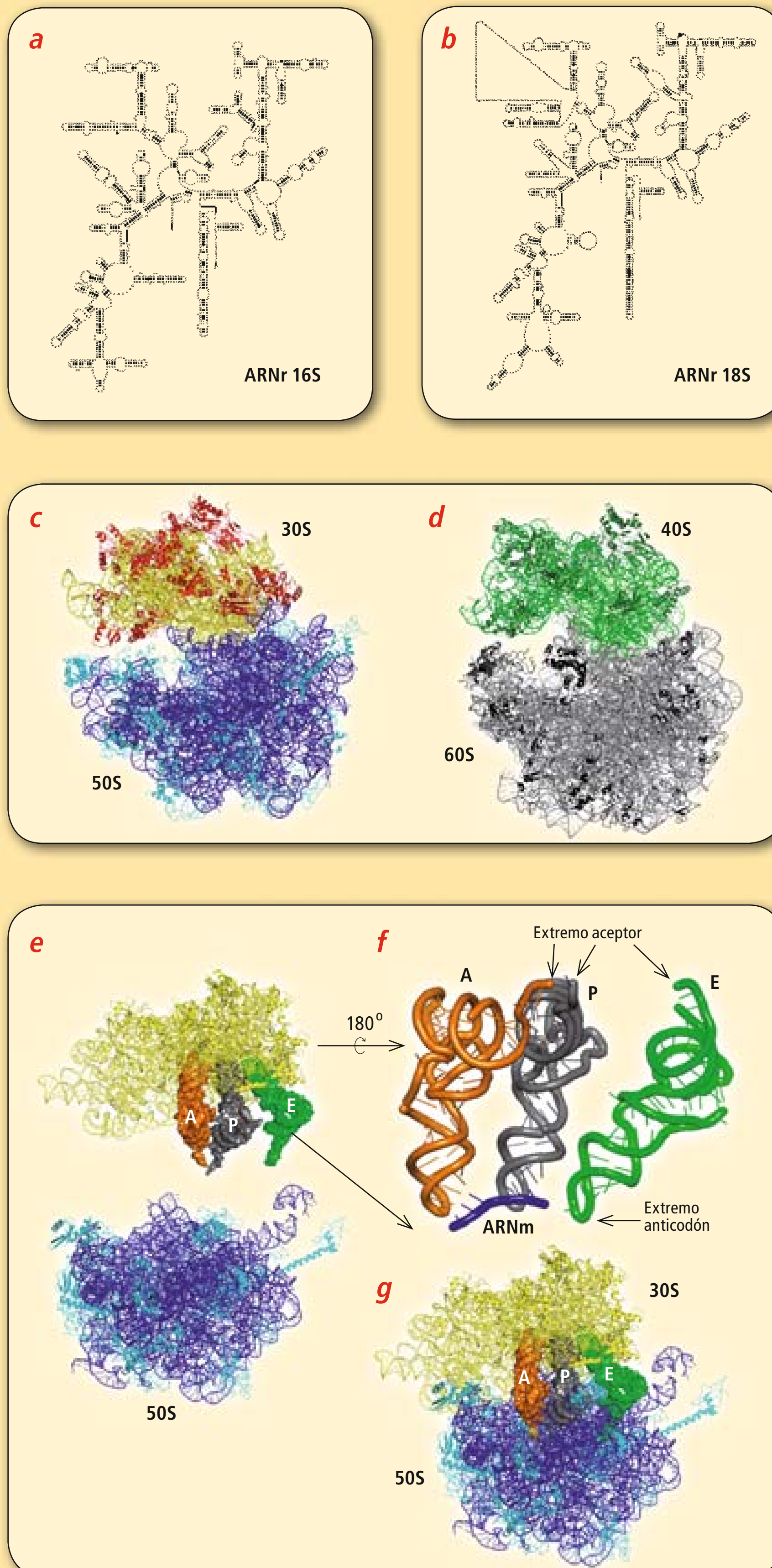




2. DIFERENCIAS ENTRE ARN Y ADN. Dos nucleótidos: adenosina monofosfato (rAMP), un componente del ARN, y desoxiadenosina monofosfato (dAMP), su equivalente en el ADN. Nótese la presencia de un grupo hidroxilo extra en rAMP, formado por un oxígeno (O) y un hidrógeno (H) (*en rojo*).

DANIEL A. COLON RAMOS Y ANTON VILA SANJURJO

CONSERVACION DE LA ESTRUCTURA DEL RIBOSOMA

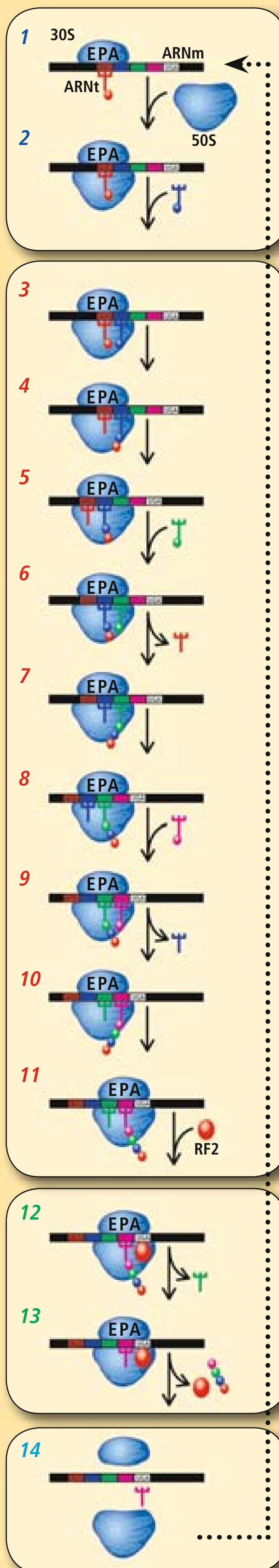


A pesar de que la molécula de ARN ribosómica (ARNr) 18S de la levadura *Saccharomyces cerevisiae* (*b*) es 256 nucleótidos más larga que la de ARNr 16S de la bacteria *Escherichia coli* y su secuencia es muy diferente, presentan un plegamiento muy parecido, semejanza que se mantiene en tres dimensiones, tal y como se muestra en *c* y *d*.

El panel *c* representa la estructura tridimensional del ribosoma 70S de *E. coli* obtenida por nuestro grupo, por medio de la cristalografía de rayos X. Los componentes de la subunidad pequeña se muestran en color amarillo (ARNr 16S) y rojo (proteínas), mientras que los de la subunidad grande se muestran en azul (ARNr 23S y 5S) y cian (proteínas). En *d* se muestra la reconstrucción del ribosoma 80S de la levadura *Saccharomyces cerevisiae* obtenida por el grupo de Joachim Frank, de la Universidad estatal de Nueva York en Albany. Los componentes de la subunidad pequeña se muestran en color verde claro (ARNr 18S) y verde oscuro (proteínas), mientras que los de la subunidad grande aparecen en gris (ARNr 23S, 5.8S y 5S) y negro (proteínas). (Dado que para la reconstrucción se utilizaron las estructuras cristalográficas de las subunidades 30S [bacteria] y 50S [arquea], el modelo carece de las extensiones características y, por tanto, no refleja el tamaño real, de los ribosomas eucariotas.)

En *e* se ven las tres posiciones posibles de los ARN de transferencia (ARNt), A (*naranja*), P (*gris*) y E (*verde*), en la subunidad pequeña (*en amarillo*) de *E. coli*. La subunidad grande (*azul y cian como en c*) se muestra separada. El detalle de los tres ARNt (*mismo color que en c*) que se ve en *f* muestra la interacción de sus extremos anticodón con un fragmento del ARN mensajero (ARNm, *azul*). Además se muestra la proximidad de los extremos aceptores de los ARNt A y P, que permite la interacción química de los aminoácidos normalmente presentes en ese extremo durante la formación del enlace peptídico en la cavidad catalítica del ribosoma, el centro peptidil-transferasa (en la figura no se muestran los aminoácidos; téngase en cuenta además que los ARNt han sido rotados 180º alrededor del ARNm). Por último, *g* muestra los tres ARNt en el ribosoma 70S después de la unión de la subunidad grande.

DANIEL A. COLON RAMOS Y ANTON VILA SANJURJO



El ciclo de la traducción

La sucesión de eventos durante la traducción es la siguiente (nótese que los factores proteicos necesarios durante la traducción, excepto RF2, no se han incluido, para mayor claridad):

1. La traducción comienza al reconocerse el codón de iniciación, AUG, en el sitio P, o peptidil, de la subunidad pequeña del ribosoma, donde el extremo anticodón del ARNt iniciador "lee" su codón complementario, AUG.

2. Una vez reconocido este codón, se une la subunidad grande al complejo de iniciación 30S. Se forma entonces el complejo de iniciación 70S, en el que el extremo aceptor del ARNt iniciador, unido al aminoácido formil-metionina, se encuentra en una cavidad de la subunidad grande denominada "centro peptidil-transferasa". En este centro se desarrolla la actividad catalítica de polimerización de aminoácidos. Comienza entonces la fase de elongación en la que se utilizarán los otros dos sitios ribosómicos, "A", o aminoacil, y "E", o de salida (del inglés *exit*).

3. El primer paso de esta fase consiste en la unión del segundo ARNt al sitio "A". Mediante este proceso de decodificación, el código genético es leído por el extremo anticodón del nuevo ARNt en el sitio A de la subunidad pequeña.

4. Una vez aceptado el ARNt correspondiente al segundo codón del ARNm, el aminoácido de su extremo aceptor entra en la cavidad peptidil tranferasa. La reacción de polimerización de este aminoácido con la formil-metionina, inmediata, produce un dipéptido (dos aminoácidos unidos mediante enlace peptídico) que queda unido al segundo ARNt.

5. A continuación viene la reacción de translocación de los dos ARNt, que resulta en el movimiento del ARNt del sitio "P" al sitio "E" y del ARNt del sitio "A" al sitio "P". El ARNm se mueve simultáneamente con los ARNt; este proceso termina con un sitio "A" vacío, donde el siguiente codón se encuentra listo para ser reconocido por su correspondiente ARNt.

6. El ciclo de la elongación se repite para cada nuevo aminoácido de la proteína (7, 8, 9, 10, y 11).

12. La elongación termina cuando el ribosoma alcanza uno de los tres codones de terminación, UGA, UAA o UAG. Al no haber ARNt específicos para estos codones, el ribosoma se detiene en ellos hasta que es liberado por medio de la acción de factores de terminación.

13. Los factores de terminación RF1 y RF2 (RF, del inglés *release factor*) reconocen los codones de terminación (en *Escherichia coli* RF1 reconoce UAG y UAA, mientras que RF2 reconoce UGA y UAA) e inducen la liberación de la cadena peptídica. Esta cadena abandona el ribosoma por medio de un túnel que atraviesa la subunidad grande y que comienza en la cavidad peptidil transferasa.

14. El ciclo de la síntesis de proteínas concluye al desensamblarse el ribosoma 70S en sus dos subunidades; éstas pueden utilizarse en un nuevo ciclo.

1 – 2	Iniciación	12 – 13	Terminación
3 – 11	Elongación	14	Reciclaje

DANIEL A. COLON RAMOS Y ANTON VILA SANJURJO

Los autores

Daniel A. Colón Ramos y **Antón Vila Sanjurjo** han trabajado en diversos aspectos de la traducción celular. Colón Ramos, natural de Barranquitas, San Juan de Puerto Rico, estudió en la Universidad de Harvard y la Universidad Duke antes de investigar la regulación de ribosomas eucariotas en la Universidad de California en Berkeley. Actualmente dirige un laboratorio de neurobiología en la Escuela de Medicina de la Universidad de Yale (http://www.cellbiology.yale.edu/colon-ramos/index.html). Vila Sanjurjo inició sus estudios de biología en su ciudad natal de La Coruña. Su relación con la investigación del ribosoma comenzó en la Universidad de Nebraska en Omaha, donde acabó su licenciatura, y continuó durante su doctorado en la Universidad Brown en Providence, Rhode Island. Su paso por el laboratorio de Jamie Cate en la Universidad de California en Berkeley le introdujo en los estudios estructurales del ribosoma por medio de la cristalografía de rayos X. Actualmente trabaja en el centro de biología sintética de la Universidad de California en Berkeley.

mayoría de las veces, la encuentra antes de que la ARNpol alcance *tnaA* y *tnaB*. El resultado neto es que las proteínas TnaA y TnaB se producen en muy poca cantidad cuando no son necesarias, es decir, cuando no hay triptófano en el medio.

La situación cambia drásticamente cuando hay triptófano presente. En este caso, la expresión de TnaA y TnaB es imprescindible para que la célula pueda utilizar el aminoácido como alimento. El grupo de Yanofsky descubrió que, en semejantes condiciones, los ribosomas que han alcanzado el codón de terminación de *tnaC* se muestran incapaces de concluir la traducción de TnaC; por una razón: RF2 es incapaz de desprender la proteína del ribosoma. ¿Cómo puede el triptófano impedir la liberación de TnaC?

El ribosoma desempeña un papel central en ese mecanismo, tal y como quedó establecido gracias a un elegante experimento en el que el codón de terminación de *tnaC*, UGA, fue sustituido por el codón de triptófano UGG. Los resultados del experimento fueron claros: cuando UGA se sustituye por UGG, no sólo el aminoácido triptófano puede hacer que TnaC se atasque en el ribosoma; también el ARNt específico del triptófano, cargado con este aminoácido en su extremo aceptor, puede producir el mismo efecto. De lo que se desprende que el triptófano aislado debe ocupar el mismo sitio del ribosoma que el triptófano unido al extremo aceptor de su ARNt específico.

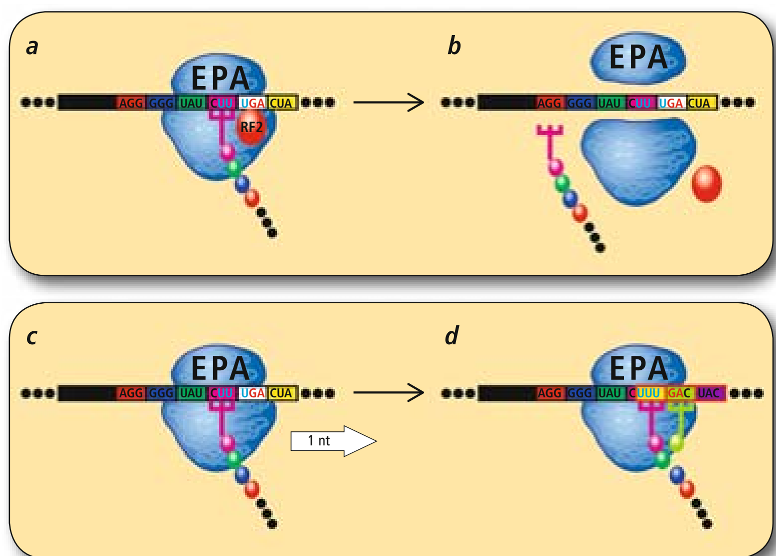
Puesto que los ARNt colocan sus aminoácidos en el sitio A del centro peptidil transferasa, el sensor del triptófano en el ribosoma debe ser el sitio en cuestión. Cuando abunda triptófano, una molécula suya se coloca en el centro peptidil transferasa e impide que RF2 se desgaje de la proteína TnaC del ribosoma. Al permanecer la proteína TnaC atascada en el ribosoma, no permite que éste se disocie del ARNm, con lo cual el factor Rho es incapaz de unirse al mismo. Bajo esas condiciones, la ARNpol queda libre para transcribir *tnaA* y *tnaB*, que son inmediatamente traducidos por otro ribosoma. El resultado final del proceso es que, cuando hay triptófano en el medio, las enzimas necesarias para su utilización, TnaA y TnaB, se expresan en grandes cantidades.

Por lo que se refiere a los distintos niveles de control de la expresión génica durante la regulación del operón *tna*, la unión de un aminoácido a la cavidad de transferencia peptídica del ribosoma en la traducción es utilizada por la célula para regular la expresión génica en el nivel de la transcripción.

3. ARNm polifacéticos. En los organismos eucariotas no existen operones. Cada gen da lugar a un ARNm. Apoyados en ese dato, se creía que la expresión de cada gen codificaba una sola proteína específica. No obstante, la revolución genómica y proteómica de los últimos años nos han mostrado que la situación es mucho más compleja. Por ejemplo, los más de 25.000 genes humanos expresan más de 100.000 proteínas diferentes. ¿En virtud de qué cada gen humano codifica un solo ARNm y un promedio de cuatro proteínas diferentes?

El ribosoma suele escoger el primer codón de iniciación que encuentra en un contexto favorable y traduce a partir de ese codón. Sin

Recodificación durante la traducción de RF2



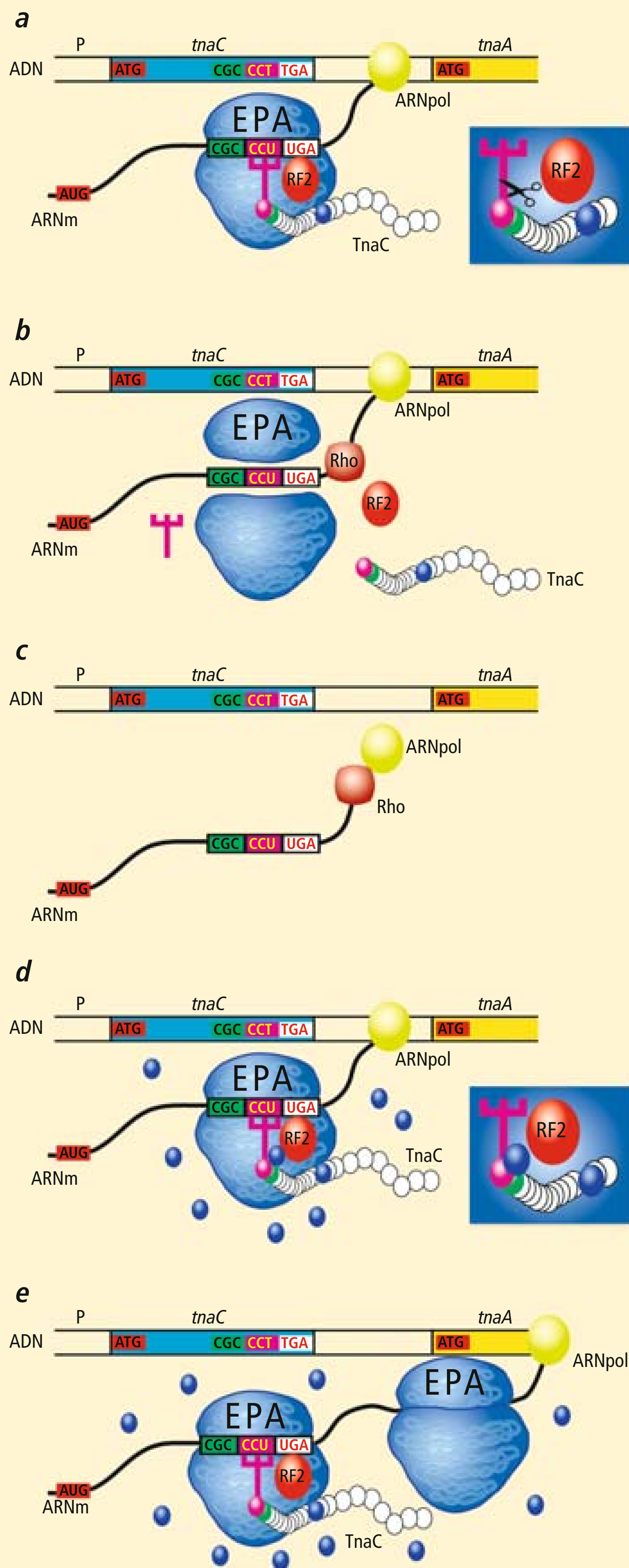
En *Escherichia coli* y en un gran número de bacterias, el gen y el ARNm que codifican el factor de terminación RF2 se componen de una secuencia corta que codifica la primera parte del factor y que termina con el codón de terminación UGA. Esta parte se continúa con una secuencia larga que codifica el resto de la proteína y cuya decodificación requiere que el ribosoma cambie su marco de lectura al marco de lectura +1 (es decir, desplazado un nucleótido, lo que cambia la secuencia de codones).

En el esquema se muestra la zona del ARNm de RF2 donde ocurre el cambio de marco de lectura y su posición en el ribosoma (*a* y *c*). Este mecanismo de regulación requiere la presencia de una secuencia "resbaladiza", que promueve cambios de marco de lectura, justo antes del codón de terminación UGA. La secuencia en cuestión es CUU UGA C, con el codón CUU, que codifica el aminoácido leucina, solapado con el codón UUU en el marco de lectura +1 (*cian*). Los ribosomas que han decodificado CUU (*rectángulo magenta*) y se han translocado contienen, en el sitio P del ribosoma, un ARNt específico para la leucina (ARNt^{leu}, por claridad mostrado en magenta, al igual que su codón y su aminoácido) unido a la cadena peptídica del primer fragmento de RF2, así como el codón de terminación UGA (*rectángulo blanco*) en el sitio A (*a* y *c*).

Cuando RF2 abunda (*círculo rojo en a*), la mayoría de los ribosomas se unen al factor que reconoce el codón de terminación UGA en el sitio A y promueven la terminación de la traducción. Como consecuencia, deja de sintetizarse la versión completa y activa de RF2 (*b*). Sin embargo, cuando escasea RF2 el ARNt^{leu} en el sitio P puede disociarse del codón CUU para reasociarse en el codón solapante UUU; la traducción continúa, pero ahora en el marco de lectura +1 (*c* y *d*).

En este ingenioso sistema de regulación de los niveles de RF2, la eficacia del cambio de marco de lectura es inversamente proporcional a la concentración del factor.

DANIEL A. COLON RAMOS Y ANTON VILA SANJURJO



El centro peptidil transferasa es el sensor de los niveles de triptófano en la célula

En *Escherichia coli* y en otras bacterias, al principio del operón tna y precediendo al gen de la triptofanasa, tnaA (*amarillo*), existe un corto marco de lectura que codifica una proteína de 34 aminoácidos, tnaC (*cian*). Los genes tnaC y tnaA están separados por una región no codificante de 200 nucleótidos que contiene varios sitios donde la ARNpol hace pausas durante la transcripción. La ARNpol comienza la transcripción del operón tna, haya o no triptófano. En cuanto la ARNpol inicia la transcripción del marco de lectura tnaC, un ribosoma reconoce su sitio de unión en el ARNm y empieza la traducción del polipéptido hasta que llega al codón de terminación UGA (*en rojo sobre blanco*) (*a* y *d*). Nótese que la base equivalente a U (uracilo) en el ADN es T (timina).

En ausencia de triptófano, el reconocimiento de UGA por RF2 (*a*), con la consecuente liberación del polipéptido, también producida por RF2 (*véase el recuadro en a*), y finalmente la disociación del ribosoma (*b*), expone una secuencia del ARNm justo después de UGA, que el complejo proteico Rho reconoce. La función de este complejo es la de buscar una ARNpol entre las secuencias de tnaC y tnaA, para desgajarla del ADN y provocar así la terminación prematura de la transcripción antes de que ARNpol pueda alcanzar tnaA (*c*).

El resultado es que, cuando la triptofanasa no es necesaria, por no haber triptófano que degradar, su síntesis se mantiene a niveles muy bajos. La situación cambia de raíz si existe triptófano en el medio (*d* y *e*). Se sabe que el triptófano (*óvalo azul*) se une al ribosoma e impide la liberación del polipéptido TnaC del ribosoma (*d*), que permanece bloqueado al final de tnaC. Entonces, Rho no puede cargarse en el ARNm y ejercer su función de terminador de la transcripción, que prosigue a través de los genes importantes del operón (*e*). Inmediatamente después de que la ARNpol alcanza tnaA, un ribosoma comienza su traducción (*e*). El resultado es que la proteína triptofanasa se sintetiza en grandes cantidades para degradar el triptófano circundante.

DANIEL A. COLON RAMOS Y ANTON VILA SANJURJO

embargo, en ciertas ocasiones, los ribosomas ignoran ese primer codón de iniciación y continúan vagando sobre el ARNm hasta localizar un segundo o un tercer codón alternativo. Dado que alrededor del 50 por ciento de los ARNm humanos contienen varios codones de iniciación, se abre la posibilidad de que se produzcan múltiples proteínas a partir de un solo ARNm, según el punto en que el ribosoma decide comenzar la iniciación.

Esta capacidad de producir varias proteínas a partir de un mismo ARNm permite a las células eucariotas responder con rapidez a los retos a que se enfrentan. Así, las levaduras poseen un sistema de emergencia para sobrevivir a la escasez de nutrientes basado en la proteína Gcn4p. En situaciones normales, las

concentraciones de Gcn4p en las levaduras son muy bajas, dado que el mantenimiento del mecanismo de emergencia es costoso en energía. Por ello, la levadura sólo produce Gcn4p en situaciones de vida o muerte. No hay entonces mucho tiempo para esperar; por eso, en las levaduras ha evolucionado un mecanismo que regula la expresión de Gcn4p durante la traducción.

El ARNm que codifica Gcn4p está siempre presente en las células de levaduras y listo para producir Gcn4p; sin embargo, en condiciones normales, este trascripto produce niveles muy bajos de la proteína. Semejante comportamiento se explica porque el ARNm tiene otros cuatro codones de iniciación que preceden al codón de iniciación de Gcn4p. Estos cuatro codones de iniciación dan lugar a la expresión de cuatro proteínas diferentes de Gcnp4, pero codificadas por su mismo ARNm.

En situaciones normales, los ribosomas traducen la proteína codificada por el corto marco de lectura que marca el primer codón de iniciación. Una vez finalizada la traducción de esta proteína, el ribosoma se disocia, pero algunas subunidades 40S permanecen ensambladas al ARNm y comienzan la traducción al llegar al segundo, tercero o cuarto codón de iniciación. Por este motivo, es muy baja la probabilidad de que los ribosomas empiecen la traducción en el codón de iniciación de Gcn4p.

Sin embargo, en caso de emergencia, la situación sufre un cambio drástico. La levadura detecta el problema y activa una señal que culmina en la modificación química, por medio de la fosforilación (la combinación con un grupo fosfato), de uno de los factores de iniciación de la traducción: la proteína eIF2α, cuya asociación al ribosoma es crítica para el comienzo de la traducción.

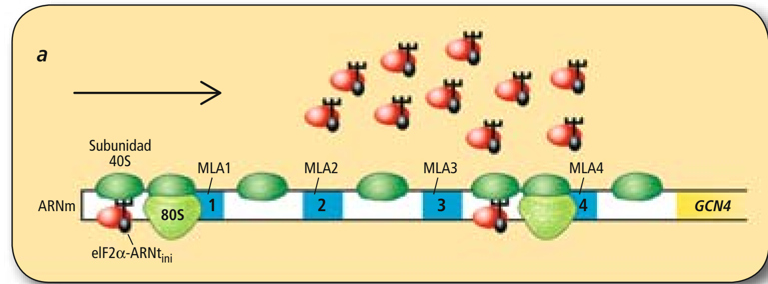
Cuando la proteína se fosforila, no puede asociarse con el ribosoma, y éste, incapaz entonces de iniciar la traducción, sigue desplazándose por el ARNm. No todas las copias de eIF2α se fosforilan durante la escasez de nutrientes; sólo una fracción, en cuantía suficiente para causar que un número elevado de ribosomas continúen desplazándose por el trascripto de Gcn4p hasta dar con el codón de iniciación que controla la expresión de Gcn4p. Se decuplican entonces los niveles celulares de Gcn4p, con la activación consiguiente de los mecanismos de respuesta necesarios para la supervivencia en situaciones de escasez.

Sólo hemos visto algunos de los muchos mecanismos en los que la expresión génica se regula en el nivel de la traducción. Que la lista de ejemplos de este tipo de regulación no deje de crecer subraya el papel principal del ribosoma y de la traducción genética en la evolución.

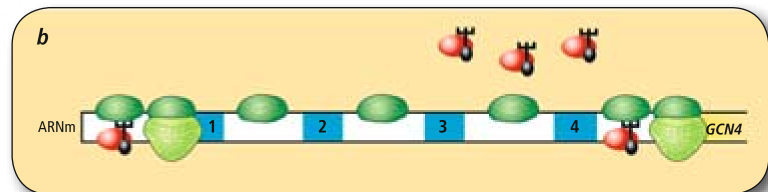
DANIEL A. COLON RAMOS Y ANTON VILA SANJURJO

Traducción de la proteína de emergencia Gcn4p

El ARNm que codifica a la proteína Gcn4p (*representado como un largo rectángulo blanco en a y b*) contiene cuatro codones de iniciación, que originan cuatro cortos marcos de lectura abierta, o MLA (*mostrados como pequeños recuadros en cian, numerados del 1 al 4 en a y b*), antes del codón de iniciación que da lugar al MLA que codifica la proteína (*GCN4 en amarillo en a y b*). La dirección de movimiento de los ribosomas en el ARNm es señalada por la flecha.



Cuando abundan los nutrientes, la subunidad 40S (*verde oscuro*) se carga en el extremo del ARNm próximo al primer codón de iniciación. Durante su periplo hacia el MLA-1, la subunidad 40S recibe al ARNt iniciador, ARNtini (*negro*), que forma un complejo con eIF2α (*óvalo rojo*). La subunidad 40S asociada con eIF2α-ARNtini está preparada para comenzar la traducción de MLA-1, una vez reconocido su codón de iniciación y tras unirse a la subunidad 80S (*verde claro*). Al final de MLA-1 la subunidad 80S se disocia; algunas subunidades 40S siguen su marcha hacia los otros MLA. Si la subunidad 40S se encuentra con un complejo eIF2α-ARNt$_{ini}$, podrá comenzar la traducción de uno de estos MLA. La probabilidad de este evento aumenta con la distancia desde el lugar de disociación de la subunidad 80S, es decir, desde el codón de terminación de MLA-1. La distancia entre los diferentes MLA está programada para que la mayoría de los episodios de reiniciación ocurran en el MLA-4. Esto a su vez crea una barrera muy eficiente contra la reiniciación en el vecino codón de iniciación de GCN4.



Si los nutrientes escasean, eIF2α se modifica químicamente, de modo que la concentración del complejo eIF2α-ARNtini disminuye y con ello las probabilidades de reiniciación en MLA-4. La falta de iniciación en MLA-4 favorece, sin embargo, que la iniciación ocurra en GNC4, de modo que la expresión de la proteína Gcn4p aumenta hasta 10 veces bajo estas condiciones.

Bibliografía complementaria

STRUCTURE OF THE 80S RIBOSOME FROM *SACCHAROMYCES CEREVISIAE* — TRNA-RIBOSOME AND SUBUNIT-SUBUNIT INTERACTIONS. C. M. T. Spahn, R. Beckmann, N. Eswar, P. A. Penczek, A. Sali, G. Blobel y J. Frank en *Cell*, vol. 107, págs. 373-386; 2 de noviembre, 2001.

RECODING: TRANSLATIONAL BIFURCATIONS IN GENE EXPRESSION. Pavel V. Baranov, Raymond F. Gesteland y John F. Atkins en *Gene*, vol. 286, págs. 187-201; 2002.

INSTRUCTION OF TRANSLATING RIBOSOME BY NASCENT PEPTIDE. Feng Gong y Charles Yanofsky en *Science*, vol. 297, págs. 1864-1867; 2002.

TRANSLATIONAL REGULATION OF GCN4 AND THE GENERAL AMINO ACID CONTROL OF YEAST. Alan G. Hinnebusch, en *Annual Review of Microbiology*, vol. 59, págs. 407-450; 2005.

Pasado, presente y futuro de las VACUNAS

Los conocimientos modernos sobre el sistema inmunitario han reavivado el interés por añadir ingredientes que permitan mejorar antiguas vacunas y crear otras nuevas

Nathalie Garçon y Michel Goldman

Pensar en los defectos congénitos que provoca la rubeola, en las hileras de pulmones de acero ocupadas por niños lisiados a causa de la polio o en el terrible sonido de un bebé luchando contra la tos ferina todavía provoca pavor entre quienes han conocido de primera mano el daño infligido por estas y otras enfermedades que pueden evitarse mediante vacunas. Afortunadamente, dichos azotes resultan punto menos que desconocidos para las generaciones actuales, que han tenido acceso a las vacunas durante toda su vida.

Durante más de 200 años, las vacunas han demostrado ser uno de los métodos de prevención de enfermedades infecciosas más exitosos, más económicos y que más vidas ha salvado, sólo por detrás de la potabilización del agua. Las vacunas han salvado de la muerte prematura o de enfermedades paralizantes a millones de personas; en 1979, hicieron posible la erradicación de la viruela a escala global. Hoy en día, los expertos en sanidad prometen eliminar la poliomielitis, el sarampión y, andando el tiempo, hasta la malaria, aunque, como veremos más adelante, para que una vacuna contra la malaria tenga éxito harán falta nuevas estrategias de inmunización.

En líneas generales, la premisa de la vacunación consiste en que la exposición a una pequeña muestra de un organismo patógeno enseña al sistema inmunitario humano a reconocerlo y a prepararse para combatirlo la próxima vez que se encuentre con él. Pero las vacunas clásicas no siempre funcionan con todo el mundo, ni nos protegen de todo tipo de enfermedades. Algunos grupos de población, como los ancianos, pueden tener un sistema inmunitario demasiado débil como para responder adecuadamente ante las vacunas tradicionales. Y determinados organismos patógenos evaden el tipo de defensa inmunitaria que inducen las vacunas. (La malaria, la tuberculosis y el sida constituyen ejemplos de enfermedades que todavía no pueden prevenirse mediante vacunas.) Los principios de la vacunación podrían también extenderse a otras muchas afecciones (cáncer, alergias, enfermedad de Alzheimer), pero estas aplicaciones deberían conseguir que el sistema inmunitario respondiera ante algo que en condiciones normales no reconoce o que, en todo caso, lo hace de forma muy débil.

En todas esas situaciones, los estimuladores del sistema inmunitario que aumenten la capacidad del organismo para reconocer y responder ante una vacuna marcarían la diferencia. Esos inmunoestimuladores suelen denominarse adyuvantes (de *adjuvare*, "ayudar" en latín). Algunos nos son familiares desde hace más de un siglo y se han utilizado para mejorar vacunas y terapias contra el cáncer. Sin embargo, los detalles de la interacción entre adyuvantes y células inmunitarias no se han conocido hasta hace muy poco, tal y como ha ocurrido con los mecanismos que subyacen bajo las vacunas. Sobre todo durante el último decenio, se han producido enormes avances en inmunología que han arrojado luz sobre los efectos de los adyuvantes; asimismo, se han abierto nuevas vías para el diseño de vacunas a la medida de los grupos de población que deben ser protegidos y del patógeno contra el que hay que protegerlos. Con esas nuevas herramientas, se están desarrollando vacunas

CONCEPTOS BASICOS

- Las vacunas son extraordinariamente eficaces a la hora de prevenir enfermedades, pero podrían actuar mejor, en más personas y contra un espectro más amplio de enfermedades.
- Los avances en inmunología demuestran que los nuevos adyuvantes (ingredientes que instan la respuesta inmunitaria contra las vacunas) permiten dirigir las vacunas contra determinados grupos de la población o contra patógenos concretos.
- Los nuevos adyuvantes pueden hacer que las vacunas disponibles resulten más eficaces y convertir en realidad vacunas que antes se consideraban imposibles.

que antes eran imposibles de crear y se están mejorando las vacunas ya existentes.

Imitar la infección para evitarla

Muchas infecciones tienen, por lo menos, una ventaja: un brote de la enfermedad confiere inmunidad de por vida frente al patógeno. Una vacuna ideal también debería poder ofrecer una protección duradera, preferiblemente tras una única dosis, y proteger también contra otras amenazas similares; por ejemplo, todos los miembros de la familia del virus de la gripe humana, en continua evolución. Para conseguir tales objetivos, una vacuna debe implicar a varios tipos de células inmunitarias, las mismas que resultan estimuladas durante una infección real.

Cuando un patógeno ambiental entra por primera vez en el organismo, se encuentra de inmediato con células del sistema inmunitario innato que están continuamente patrullando en busca de invasores. Entre esos centinelas están los macrófagos y las células dendríticas, que engullen y destruyen los patógenos y las células del organismo infectadas. Luego, descomponen los materiales intrusos que han ingerido y exhiben muestras de los mismos (antígenos), de modo que los miembros del sistema inmunitario adaptativo (las células B y las células T) se familiarizan con el aspecto del patógeno. Al propio tiempo, las células presentadoras de antígenos liberan señales químicas (citoquinas) que inducen la inflamación y alertan de la emergencia a las células T y B.

En una población madura de células B y T adaptadas a un patógeno concreto, las células B liberan moléculas de anticuerpo y las células T asesinas buscan y destruyen las células que ya han sido colonizadas por el invasor. Se tarda unos días para que las interacciones con las células presentadoras de antígenos den lugar a esas células B y T hechas a medida, pero un subconjunto de ellas permanece en el organismo (a veces durante decenios) a modo de "células de memoria", listas para aplastar cualquier intento de reinfección por parte del mismo organismo. Las vacunas reproducen ese proceso mediante la introducción de un patógeno entero o fragmentario para que sean reconocidos como invasores intrusos. No todas las vacunas generan una respuesta inmunitaria completa; sin embargo, en algunos casos los anticuerpos bastan para neutralizar a los patógenos, de modo que no hacen falta células T asesinas para la protección.

La naturaleza del patógeno y su mecanismo de acción son algunas de las consideraciones que tienen en cuenta los diseñadores de vacunas a la hora de seleccionar el tipo



AMY GUIP

Vacunas: simulacro de infección

Las vacunas suministran un patógeno muerto o debilitado, o fragmentos de él, para desencadenar una respuesta inmunitaria que genere células "de memoria" adiestradas para reconocer rápidamente a ese mismo microorganismo en el futuro. Más adelante, esas células bloquean infecciones reales o, por lo menos, minimizan la enfermedad.

Citoquinas
Célula dendrítica
Fragmentos del virus
Lugar de la inyección
Virus en la vacuna
Células infectadas
Macrófago
Maduración y migración hacia los nódulos linfáticos
Nódulo linfático
Citoquinas
Antígeno
Precursores de las células T
Células T asesinas
Células T coadyuvantes
Célula B
Anticuerpos

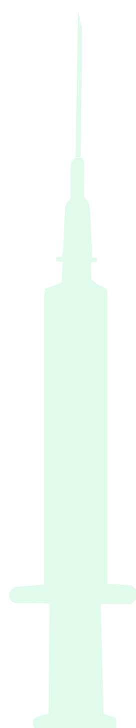
ADMINISTRACION DE LA VACUNA
Un tipo común de vacuna consiste en una pequeña dosis de virus vivos pero atenuados. Inyectados en la piel, los virus infectarán algunas células y se reproducirán lentamente. Las células del sistema inmunitario "innato", —los macrófagos y las células dendríticas— engullen y digieren tanto el material foráneo como las células del organismo infectadas. Las células dendríticas también emiten señales en forma de citoquinas, que hacen saltar las alarmas.

MIGRACION E INTERACCIONES DE LAS CELULAS DENDRITICAS
Cargadas con el material foráneo (antígenos), las células dendríticas maduran y migran hacia los nódulos linfáticos para interaccionar con las células T y las células B, componentes del sistema inmunitario "adaptativo". Mediante la exposición de los antígenos y la emisión de citoquinas, las células dendríticas provocan la maduración de las células T para generar dos tipos de célula: las células T coadyuvantes y las células T asesinas; las células T coadyuvantes también emiten señales para incitar el ataque de las células T asesinas a las células infectadas e inducen a las células B a producir anticuerpos fabricados a la medida del patógeno.

de antígeno que van a utilizar. El material administrado mediante una vacuna estándar puede consistir en bacterias o virus vivos pero debilitados (atenuados); versiones muertas o inactivadas del patógeno completo; o proteínas purificadas procedentes del patógeno original. Cada opción tiene sus ventajas y sus inconvenientes.

Las vacunas vivas atenuadas se reproducen muy lentamente en el organismo, pero puesto que se reproducen y, por tanto, continúan presentando antígenos al sistema inmunitario, desencadenan una respuesta inmunitaria robusta y de larga duración. Sin embargo, debido a su naturaleza infecciosa, no pueden utilizarse en individuos con el sistema inmunitario debilitado, pues podría verse desbordado. El riesgo de que ciertos virus muten y reviertan a su forma virulenta explica por qué resulta demasiado peligroso utilizar vacunas atenuadas en el caso de patógenos letales, como el virus del sida.

Más frecuentes son las vacunas que constan de partículas víricas completas, que se han obtenido "matando" al virus, calentándolo por ejemplo. Aunque las partículas no pueden replicarse, las proteínas víricas siguen relativamente intactas y a las células inmunitarias les

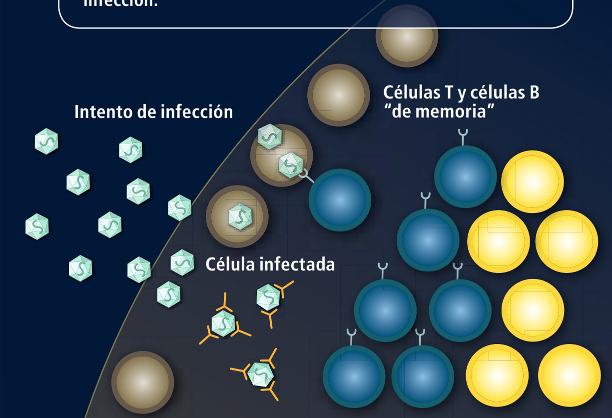


es fácil reconocerlas; con todo, es necesario inyectarlas de forma periódica para reforzar la respuesta inmunitaria.

Una tercera opción corresponde a las vacunas formadas por un fragmento (o subunidad) del patógeno. Tales vacunas presentan el antígeno al sistema inmunitario sin introducir microorganismos, enteros o no. Ese antígeno puede obtenerse del propio patógeno o puede fabricarse mediante ingeniería genética con ADN recombinante. Sin embargo, dado que las vacunas formadas por subunidades contienen sólo una parte del patógeno, no siempre desencadenan las señales de peligro necesarias para instar la respuesta inmunitaria óptima.

Los científicos se han percatado de la función crítica que desempeñan las células presentadoras de antígenos (en concreto, las células dendríticas) a la hora de evaluar la intensidad de la amenaza que representa un patógeno y de determinar la respuesta necesaria. Cuando las células dendríticas se cargan de antígenos en el lugar de la infección o en el sitio donde se ha inyectado una vacuna, maduran y migran hacia los nódulos linfáticos cercanos; allí comienzan a emitir las señales y a establecer las interacciones que provocan la respuesta protectora de las células B y las células T. En ausencia

MELISSA THOMAS (*ilustración*)



de los indicadores de peligro característicos de los microorganismos, las células dendríticas no maduran ni migran correctamente; a menudo, las vacunas formadas por subunidades necesitan un adyuvante que proporcione la señal de alarma que estimule a las células dendríticas a entrar en acción.

La mayoría de las vacunas utilizadas en los EE.UU. contienen uno de los adyuvantes más antiguos que se conocen: el alumbre (una familia de sales de aluminio). Aunque el alumbre se ha utilizado en las vacunas humanas desde los años treinta del siglo xx y ha demostrado su utilidad en numerosas vacunas actuales, no sirve de ayuda en el caso de las vacunas cuya eficacia depende de algo más que la protección que ofrecen los anticuerpos.

Varios patógenos que causan infecciones letales (el virus del sida, el virus de la hepatitis C, *Mycobacterium tuberculosis* o el parásito *Plasmodium*, causante de la malaria) se escapan a los anticuerpos; por tanto, una vacuna efectiva contra esos patógenos debería provocar una intensa respuesta de las células T. De hecho, los esfuerzos para luchar contra esos microorganismos tan difíciles de combatir no sólo han reavivado el interés por los adyuvantes, sino que han logrado también grandes avances en el conocimiento del sistema inmunitario que, a su vez, han posibilitado el desarrollo de adyuvantes más eficaces.

El resurgir de los adyuvantes

En los años ochenta del siglo xix, mientras Louis Pasteur se enfrentaba a un bulldog rabioso para extraerle saliva y preparar la primera vacuna contra la rabia, un traumatólogo de Nueva York inventaba sin saberlo, una técnica para reforzar la respuesta inmunitaria global, que puede considerarse la primera aplicación de los adyuvantes. William B. Coley, del Hospital del Cáncer en Nueva York, se sentía intrigado por unas publicaciones que describían la disminución o desaparición total de tumores en pacientes de cáncer que habían resultado infectados por una cepa de bacterias de *Streptococcus pyogenes*. Con la corazonada de que las reacciones inmunitarias del paciente estaban mejorando su capacidad para luchar contra los tumores, acometió en 1881 una serie de experimentos que consistían en administrar a pacientes con cáncer las bacterias vivas y, luego, infusiones de bacterias muertas. Ese tratamiento, conocido por "las toxinas de Coley", consiguió remisiones impresionantes; sin embargo, el mecanismo exacto de su funcionamiento seguiría siendo un misterio durante mucho tiempo.

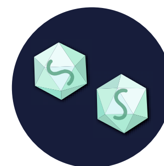
No obstante, los investigadores de principios del siglo xx se abonaron a la idea de que las bacterias y otras sustancias mejoraban las respuestas inmunitarias naturales del hombre. El veterinario francés Gaston Ramon y el inmunólogo inglés Alexander T. Glenny experimentaron con sustancias muy dispares (tapioca e hidróxido de aluminio) para mejorar la eficacia de las vacunas contra la difteria y el tétanos administradas a animales. Durante el decenio de los treinta, otros expertos descubrieron que, al dispersar los antígenos en emulsiones de aceite y agua, se mejoraba la potencia de la vacuna; además, se siguieron investigando los efectos de algunos extractos bacterianos como el lipopolisacárido (LPS), componente de ciertas paredes celulares bacterianas. Muchos de esos aditivos ejercían los efectos deseados, pero, con demasiada frecuencia, la aparición de reacciones adversas, así una inflamación excesiva, hicieron que este enfoque resultase impredecible.

En consecuencia, decayó el interés por la investigación sobre adyuvantes. Hasta los años ochenta, cuando la llegada de un nuevo desafío vírico hizo que se acometieran todas las estrategias imaginables. El virus del sida demostró hallarse muy lejos del alcance de los métodos clásicos de vacunación: atacaba selectivamente a las células T, inutilizando de una forma muy eficaz el sistema inmunitario adaptativo, y cambiaba de forma con tanta rapidez, que los anticuerpos se mantenían siempre a la zaga. Los investigadores que trabajaban con proteínas recombinantes del virus del sida debían encontrar formas de mejorar el reconocimiento de los antígenos por parte del sistema inmunitario, lo que les llevó a utilizar combinaciones de adyuvantes conocidos, así como a tratar de modificarlos para crear otros nuevos.

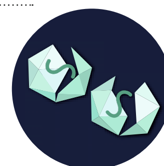
El que quizá pueda considerarse el mayor avance en la investigación sobre adyuvantes ocurrió en 1997 cuando se descubrieron, so-

TIPOS COMUNES DE VACUNA

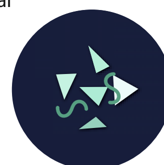
- **ATENUADA:** Virus o bacterias enteros y vivos, aunque debilitados. Su mínimo grado de reproducción prolonga la exposición del antígeno a las células inmunitarias sin causar la enfermedad.



- **INACTIVADA:** Microorganismos completos pero "muertos" e incapaces de reproducirse o de causar la enfermedad.



- **SUBUNIDAD:** Fragmentos del patógeno (material genético o proteínas externas) proporcionan un antígeno que es reconocido por las células inmunitarias.



bre la superficie y en el interior de las células dendríticas, receptores especializados que reconocían algunos de los componentes fundamentales de los microorganismo, por ejemplo la proteína flagelina, que se encuentra en la cola de multitud de bacterias. Esos receptores dotados de capacidad de detectar patógenos no sólo aportan la señal de peligro que insta la activación de las células dendríticas, sino que informan también sobre el tipo de amenaza presente. De entre los nuevos receptores celulares, los de "tipo Toll" (TLR, de "Toll like receptors") adquieren particular interés a la hora de dirigir el comportamiento de las células dendríticas [*véase* "El sistema inmunitario de alerta precoz" por Luke A. J. O'Neill; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 2005].

Hasta la fecha, se han identificado 10 receptores de tipo Toll funcionales. Cada uno reconoce un motivo básico bacteriano o vírico: TLR-4 reconoce el LPS; TLR-7 detecta el ARN de hebra sencilla característico de algunos virus. Con tales descubrimientos, quedó claro que los extractos microbianos operaban a modo de adyuvantes inmunoestimulantes porque proporcionaban una señal de peligro a las células dendríticas por medio de los TLR. Un diseñador de vacunas podía, pues, utilizar un adyuvante o una combinación de ellos para que actuaran sobre determinados TLR.

Vacunas de próxima generación

Las investigaciones iniciadas en los años ochenta y noventa del siglo pasado se proponían identificar y evaluar adyuvantes (naturales, sintéticos o modificados), que pudiesen utilizarse para modular la respuesta inmunitaria ante patógenos específicos o en determinados grupos de población. Entre esos ingredientes están los adyuvantes tradicionales (alumbre) y emulsiones de aceite en agua como MF59 y AS03, ambos aprobados en Europa para su aplicación en determinadas vacunas contra la gripe. En términos más amplios, cualquier compuesto químico que mejore la calidad y la cantidad de las respuestas inmunitarias actuando sobre las células dendríticas o sobre otras células inmunitarias puede también servir como adyuvante.

La experimentación y los avances en inmunología han permitido eliminar los elementos que provocaban toxicidad en los adyuvantes empleados con anterioridad. Ahora se obtienen mezclas de adyuvantes que optimizan su acción combinada para provocar la respuesta inmunitaria deseada. Un adyuvante nuevo, el lípido A monofosforilado (MPL), se fabricó mediante la destoxificación y posterior purificación de uno de los lípidos que forman parte de la molécula de LPS. Dio un adyuvante que tiene la capacidad de activar TLR-4 y carece de efectos tóxicos indeseados. Se ha incorporado a varias vacunas que ya se están comercializando o que se encuentran en las últimas fases de los ensayos clínicos, con resultados alentadores.

Una de estas novedades es una vacuna experimental contra la malaria en cuyo desarrollo intervino uno de nosotros (Garçon), en GlaxoSmithKline Biologicals. Causada por protozoos parásitos del género *Plasmodium*, la malaria es una grave enfermedad que mata a más de un millón de personas cada año; la mayoría de ellos, niños menores de cinco años. Los parásitos se esconden en el interior de las células, hurtándose a los mecanismos inmunitarios. Cambian de forma varias veces durante el transcurso de su ciclo biológico, lo que hace difícil encontrar un antígeno que pueda servir como diana para una vacuna durante todas las etapas de la infección. El objetivo es conseguir la inmunidad que ofrecen los anticuerpos y las células T, evitando que los parásitos entren en las células y destruyendo las células infectadas. Para ello se requieren adyuvantes más eficaces que el alumbre.

Con todos esos factores, nuestro grupo desarrolló una vacuna basada en un antígeno, al que hemos llamado RTS,S, que resulta de la unión de una proteína parcial recombinante, presente en la superficie del parásito antes de que entre en los glóbulos rojos del huésped y durante las primeras etapas de la infección celular, con un antígeno superficial del virus de la hepatitis B (que estimula aún más el reconocimiento por parte del sistema inmunitario). Luego, esa molécula compuesta se administra, junto con una mezcla de adyuvantes que contiene una emulsión de aceite en agua, MPL y QS21 (derivado vegetal de uso en medicina veterinaria desde los años treinta).

Tras optimizar la fórmula, ensayamos la vacuna, junto con nuestros colaboradores del

Los adyuvantes ponen el énfasis

Los adyuvantes intensifican las respuestas inmunitarias contra los antígenos de las vacunas mediante varios mecanismos, pero sus efectos más intensos se deben a la activación, en las células dendríticas, de receptores especializados en el reconocimiento de microorganismos. Según el tipo de amenaza que detecten, las células dendríticas darán instrucciones a otras células inmunitarias para que respondan de formas distintas. Ello puede aplicarse a la selección de adyuvantes que no sólo intensifiquen la respuesta inmunitaria sino que también enfaticen las respuestas deseadas.

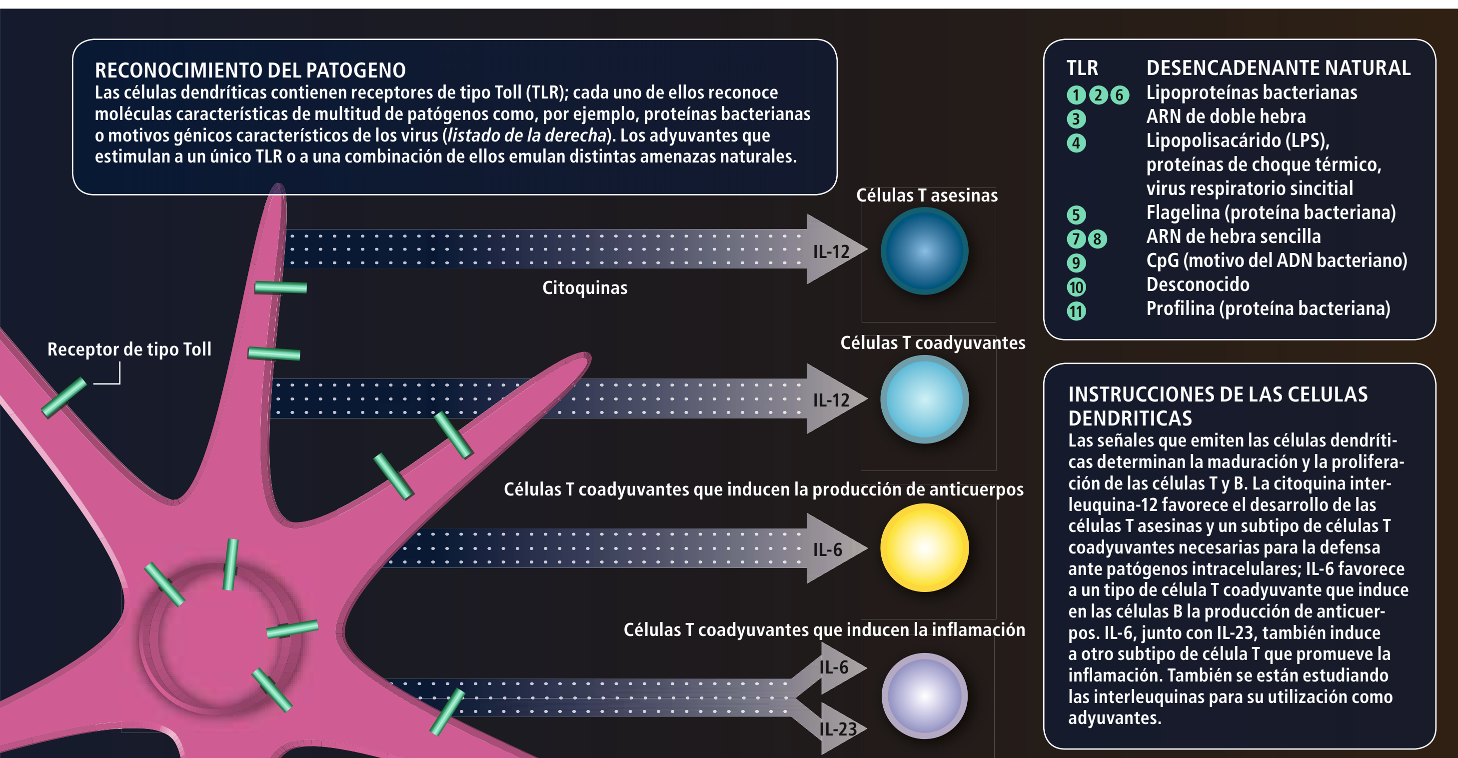
ADYUVANTES ANTIGUOS Y NUEVOS

ADYUVANTES EN VACUNAS REGISTRADAS
- Sales de aluminio (alumbre)
- Emulsiones "aceite en agua" y "agua en aceite"
- Liposomas (partículas lipídicas)
- Virosomas (lípidos + proteínas víricas)
- Vitamina E
- Lípido A monofosforilado (MPL), un derivado purificado a partir del lipopolisacárido bacteriano


ALUMBRE

ADYUVANTES EN DESARROLLO
- CpG, un motivo del ADN bacteriano que carece de los grupos metilo característicos del ADN humano
- Saponinas (extractos vegetales):
  - QS21
  - Quil A
  - Complejos inmunoestimulantes (saponina + jaulas lipídicas)
- Virus portadores de antígenos:
  - Gripe aviar (fowlpox)
  - Viruela (Vaccinia)
  - Viruela del canario (canarypox)
- Partículas parecidas a los virus (cápsulas víricas autoensambladas, que no contienen material genético)
- Interleuquinas y otras moléculas que envían señales a las células

ADAM HART-DAVIS *Photo Researchers, Inc.*



MELISSA THOMAS

Instituto de Investigación Militar Walter Reed, en pequeños ensayos clínicos con humanos. Participaron voluntarios dispuestos a introducir su brazo en una caja llena de mosquitos portadores de la malaria y recibir, por lo menos, cinco picaduras. De los siete probandos de la vacuna, seis quedaron protegidos; de los que recibieron una versión con alumbre, ninguno.

La prueba definitiva no es otra que la realizada en las condiciones de la vida real, donde la exposición al parásito es continua. En los ensayos clínicos más extensos que se llevaron a cabo con adultos en Gambia se demostró que el 71 por ciento de quienes recibieron la vacuna resultaron protegidos de la infección durante las nueve semanas que duró el seguimiento. Ensayos posteriores realizados con niños en regiones de Mozambique donde la malaria es endémica demostraron que, con tres dosis, se protegía de la infección al 30 por ciento de los niños; durante seis meses, se redujo en casi un 60 por ciento la incidencia de casos graves de la enfermedad en el grupo. Una versión mejorada de la vacuna, que contiene liposomas, está llegando al final de la última etapa (fase 3) de un ensayo clínico con niños. Al ser la primera vacuna que ha demostrado aportar una tasa de protección notable contra la infección por malaria y contra los casos graves de la enfermedad, está suscitando grandes esperanzas ante la posibilidad de que pueda contribuir al control de la epidemia.

Los autores

Nathalie Garçon dirige el Centro Global de Adyuvantes para Vacunas de GlaxoSmithKline Biologicals (GSKB), una empresa que fabrica vacunas y que ha sido pionera en el desarrollo de nuevos adyuvantes durante los dos últimos decenios. Farmacéutica especializada en inmunología, se incorporó a la compañía en 1990 para dirigir el programa de adyuvantes. **Michael Goldman** es profesor de inmunología en la Universidad Libre de Bruselas. Centra su investigación en los factores que controlan las células dendríticas y las señales emitidas por los receptores de tipo Toll, que son fundamentales para la eficacia de las vacunas y de los adyuvantes para vacunas. Hasta septiembre de 2009, dirigió el Instituto de Inmunología Médica, fundado, en parte, por GSKB. En la actualidad es director ejecutivo de la iniciativa "Medicinas innovadoras", un proyecto en el que participan la Unión Europea y la Federación Europea de Industrias Farmacéuticas.

El éxito de esta vacuna ilustra el potencial de un diseño racional (que combina antígenos y adyuvantes para provocar la respuesta inmunitaria deseada), lo mismo en la creación de nuevas vacunas que en el refinamiento de las existentes. Muchas de las vacunas que suelen funcionar bien pueden no ser seguras o eficaces en ciertos grupos de población que incluyen, precisamente, a quienes más la necesitan. La gripe estacional ofrece un ejemplo: los ancianos y los niños son los más vulnerables a las infecciones letales de gripe porque el sistema inmunitario de los niños no está completamente desarrollado y el de los ancianos ha perdido capacidad de respuesta. Tan sólo la mitad de las personas mayores de 65 años que reciben la vacuna estándar contra la gripe desarrollarán suficientes anticuerpos para prevenir la infección.

Por el contrario, una vacuna experimental contra la gripe estacional que contenía la emulsión AS03 de aceite en agua produjo cantidades de anticuerpo suficiente para proteger al 90,5 por ciento de los receptores mayores de 65 años. Puesto que los adyuvantes mejoran el reconocimiento de los antígenos por parte de las células inmunitarias, pueden también utilizarse para fabricar vacunas con menos cantidad de antígeno. Ello resulta particularmente importante en el caso de una pandemia que requiera la pronta vacunación de una población numerosa. Otra vacuna experimental que contiene AS03, contra la cepa H5N1 de la gripe aviar, desató una respuesta protectora

con anticuerpos con sólo una tercera parte del antígeno habitual en la vacuna contra la gripe estacional.

Esos ejemplos ilustran los nuevos tipos de vacunas que pronto se utilizarán de forma generalizada en humanos, a medida que el resurgimiento y el desarrollo de los adyuvantes que tuvo lugar en los años ochenta y noventa vaya rindiendo frutos. En aquella época, los científicos se percataron de que la capacidad de las células dendríticas de reconocer patrones representaba una conexión fundamental entre los sistemas inmunitarios innato y adaptativo. Ha permitido también el desarrollo de nuevos tipos de adyuvantes. Este trabajo se encuentra todavía en su inicio, pero posee el potencial de crear un arsenal de componentes para los adyuvantes que permitirá fabricar vacunas con una precisión sin precedentes.

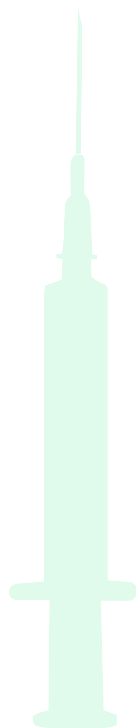
Nueva generación de adyuvantes

A la inmunología y biología molecular, se ha sumado la ciencia de materiales, que ha proporcionado multitud de nuevos métodos para conseguir efectos adyuvantes. Para encapsular medicamentos y otras sustancias se están empleando liposomas, que transportan y liberan su contenido en el tejido diana, al mismo tiempo que lo protegen de la degradación. Cuando se recurre a los liposomas para transportar los antígenos de una vacuna se consigue un grado de protección similar: crean un remanente que permite una exposición prolongada del antígeno a las células inmunitarias. Hallamos una variante de ese principio en las jaulas poliméricas para antígenos, que se construyen a partir de polisacáridos naturales (así los que se encuentran en la pared bacteriana) o de poliésteres sintéticos. Hablamos de materiales que presentan la ventaja adicional de que incorporan, de forma natural o añadida, productos químicos inmunoestimulantes que desencadenan en las células inmunitarias el tipo de señalización deseado.

Con el gradual desciframiento del lenguaje de las células inmunitarias, hemos venido conociendo que las señales precoces que emiten las células dendríticas para hacer saltar las alarmas controlan también la naturaleza de la respuesta, en función del tipo de amenaza de que se trate. Así, un diseñador de vacunas puede, en teoría, combinar adyuvantes a medida para conseguir una respuesta inmunitaria que intensifique la producción de anticuerpos o que estimule preferentemente ciertos subgrupos de células T. De hecho, entre las sustancias que se están ensayando experimentalmente como adyuvantes se encuentran las propias moléculas señalizadoras. Durante mucho tiempo se ha empleado un tipo de citoquinas, las



LA GRIPE PANDEMICA requiere la vacunación de gran parte de la población. Los adyuvantes pueden hacer que las vacunas resulten efectivas con menos cantidad de antígeno por dosis; es probable que también ayuden a proteger contra cepas de la gripe que presenten ligeras variaciones respecto de la original.



interleuquinas (IL), para reforzar la inmunidad en tratamientos contra el cáncer o contra el sida. Las interleuquinas se producen de forma natural en las células dendríticas. La mezcla de señales emitidas por la célula determina qué tipo de células inmunitarias van a responder (IL-4, IL-5 e IL-6 incrementan la producción de células T asesinas, mientras que IL-2 e IL-12 favorecen las respuestas basadas en anticuerpos).

Pueden lograrse efectos similares mediante combinaciones de activadores de los TLR. Diversos TLR reconocen componentes microbianos. El TLR-4 reconoce también moléculas liberadas por el organismo en condiciones de estrés, las proteínas de choque térmico. Algunas combinaciones de activadores de TLR con adyuvantes que no actúan sobre los TLR, como las emulsiones lipídicas, exhiben una sinergia intensa a la hora de activar las células dendríticas y pueden resultar útiles cuando se emplean en algunas de las aplicaciones de las vacunas que ofrecen mayores dificultades.

Citemos a este respecto el cáncer, una diana atípica para las vacunas porque, en vez de tratarse de un invasor extraño, las células tumorales surgen de la propia víctima. En consecuencia, el sistema inmunitario despliega cierta respuesta contra las células tumorales, pero rara vez es adecuada para combatir el cáncer. Los intentos por crear vacunas terapéuticas que despierten una reacción inmunitaria contra las células tumorales han ofrecido resultados decepcionantes; sin embargo, la correcta combinación de adyuvantes podría marcar la diferencia. Varias vacunas experimentales contra el cáncer que utilizan distintas combinaciones de adyuvantes han cosechado resultados alentadores.

Una de ellas, que se encuentra en la última fase de los ensayos clínicos, combina Mage-A3 (antígeno muy específico para determinadas células tumorales) con AS15 (mezcla adyuvante que contiene liposomas estables, MPL y QS21, así como el componente bacteriano

ANTONIO SCORZA *Getty Images*

Vacunas de última generación

Las vacunas aquí mostradas incorporan nuevos adyuvantes. Ya se han aprobado en algunos países o se encuentran en la última etapa (fase 3) de los ensayos clínicos con humanos.

ENFERMEDAD	VACUNA	COMPONENTES DEL ADYUVANTE	ESTADO DE DESARROLLO	COMPAÑIA
Hepatitis A	Epaxal	Virosomas	Aprobado en Europa	Crucell
Hepatitis B	Fendrix	AS04 (alumbre, MPL)	Aprobado en Europa	GlaxoSmithKline (GSK)
	Supervax	MPL RC-529 sintético	Aprobado en Argentina	Dynavax Technologies
	Heplisav	CpG	Fase 3	Dynavax Technologies
Virus papiloma humano	Cervarix	AS04	Aprobado en 96 países	GSK
Gripe (estacional o pandémica)	Fluad, Focetria	MF59 (emulsión de aceite en agua)	Aprobado en Europa	Novartis
	Inflexal V	Virosomas	Aprobado en Europa	Crucell
	Prepandrix, Pandemrix	AS03 (emulsión de aceite en agua, vitamina E)	Aprobado en Europa	GSK
	Vacuna estacional para ancianos	AS03	Fase 3	GSK
Malaria	Mosquirix	AS01 (liposomas, MPL, QS21)	Fase 3	GSK
Cáncer de pulmón de células no pequeñas	Vacuna Mage 3	AS15 (liposomas, MPL, QS21, CpG)	Fase 3	GSK
	CimaVax EGF	Montanide ISA-51 (emulsión de aceite en agua)	Aprobado en Cuba y Chile	Bioven

CpG). En ensayos realizados en pacientes con cáncer de pulmón de células no pequeñas, el 96 por ciento de quienes recibieron la vacuna desarrollaron una intensa respuesta de anticuerpos contra Mage-A3 y mostraron indicios de que se había desencadenado la señalización deseada, mediada por interleuquinas. Casi un tercio de los pacientes experimentaron estabilización o regresión de sus tumores. Otro ensayo clínico, en curso, aplica CpG junto con quimioterapia y radioterapia contra varios tipos de cáncer. CpG corresponde a un motivo característico del ADN bacteriano que es reconocido por TLR-9 y activa las células dendríticas para que pongan en marcha una intensa respuesta por parte de las células T. Así, su utilización como adyuvante evoca los antiguos tratamientos de William Coley, que administraba bacterias a los pacientes de cáncer. La compañía creada para desarrollar CpG como adyuvante se denominó Coley Pharmaceuticals.

Los sistemas adyuvantes que hemos descrito están ampliando los límites de la prevención de enfermedades por medio de la vacunación y están llevando grandes dosis de esperanza a regiones donde las necesidades médicas no están cubiertas. Los ensayos clínicos preliminares en los que se ha añadido CpG al antígeno de la ambrosía han demostrado que esta mezcla puede convertirse en una prometedora vacuna contra la fiebre del heno. La capacidad de los adyuvantes para inducir defensas inmunitarias con capacidad de reconocer cepas similares de la gripe ofrece la posibilidad de crear vacunas con un espectro de protección contra la gripe más amplio. Y, por primera vez, las personas cuyo sistema inmunitario se encuentra en una situación comprometida a causa de una enfermedad o de la quimioterapia pueden tener acceso a vacunas que inducen protección inmunitaria. Es posible que los adyuvantes no sean la respuesta para todas las deficiencias del arsenal actual de vacunas, pero aportarán una parte de la solución.

La modulación del sistema inmunitario constituye, por supuesto, una tarea delicada. Resulta esencial la evaluación crítica que se está llevando a cabo de la seguridad de las vacunas y de la transparencia informativa sobre las vacunas y los adyuvantes de última generación. El conocimiento sobre el modo de actuación de los adyuvantes incorporados a las nuevas vacunas está guiando su desarrollo y marcará las directrices para su uso y vigilancia. Resulta alentador que las nuevas vacunas preventivas con adyuvantes no hayan mostrado indicios de problemas preocupantes. No debemos bajar la guardia.

A medida que este campo siga progresando, las vacunas serán de mayor ayuda para determinados subgrupos de la población y se aplicarán de una forma más racional, que inducirá la protección inmunitaria óptima y, al propio tiempo, logrará un equilibrio entre seguridad y eficacia. Así será el desarrollo de las vacunas del futuro. Y el futuro está llamando a la puerta.

Bibliografía complementaria

DECIPHERING IMMUNOLOGY'S DIRTY SECRET: CAN INNATE IMMUNE ADJUVANTS SAVE VACCINOLOGY? Kate Travis en *The Scientist*, vol. 21, n.º 1, págs. 46-51; enero, 2007.

GLAXOSMITHKLINE ADJUVANT SYSTEMS IN VACCINES: CONCEPTS, ACHIEVEMENTS AND PERSPECTIVES. Nathalie Garçon y col. en *Expert Reviews of Vaccines*, vol. 6, n.º 5, págs. 723-739; octubre, 2007.

VACCINE ADJUVANTS: CURRENT CHALLENGES AND FUTURE APPROACHES. Jennifer H. Wilson-Welder y col. en *Journal of Pharmaceutical Sciences*, vol. 98, n.º 4, págs. 1278-1316; abril, 2009.

La investigación del Sol en la época de Galileo

Galileo miró con ojo de artista a través del telescopio. No es casual que pintores afamados compartiesen con Galileo un modo de contemplar la naturaleza

Horst Bredekamp

CONCEPTOS BASICOS

- A lo largo de los siglos había ido habiendo observaciones ocasionales de las manchas solares, pero sólo con la invención del telescopio se emprendería su investigación sistemática. Unos años antes, todavía sin telescopio, Kepler había encontrado una manera de ver el Sol y las manchas sin sufrir las consecuencias de su brillo.
- Tras los intentos de Johannes Fabricius y Christoph Scheiner, realizaría Galileo en la primavera de 1611 el detallado estudio telescópico de las manchas en que se cimentaría buena parte de su fama. Se pondría en marcha inmediatamente un esfuerzo cooperativo internacional que permitió objetivar la observación de las manchas.
- El interés por las manchas solares sería tan grande que el gran paisajista Claudio de Lorena, siempre atento a las condiciones de la luz del Sol, las marcaría en el disco solar en algunos de sus dibujos.

En el siglo XVII, el científico Galileo Galilei y el pintor Claude Lorrain se contaban entre los principales estudiosos del Sol. Ninguno de sus coetáneos lo ponía en duda. Lorrain falleció en 1682. Se le enterró en la iglesia de la Santissima Trinità dei Monti, en lo alto de la escalinata de la Plaza de España, en Roma. En la tumba se resaltaba, como algo de extraordinaria calidad en el conjunto de su obra, "la manera portentosa" en que plasmó "los rayos del Sol al amanecer y en el crepúsculo".

En 1613, un Claude Lorrain adolescente llegaba a Roma para permanecer allí, aunque con algunas interrupciones, hasta el fin de su vida. Ese mismo año, aparecía la obra en que Galileo exponía sus observaciones de las manchas solares. Junto con la publicación del *Sidereus Nuncius* en 1610, ese logro haría tan famoso a Galileo que, aun después de su muerte, seguiría siendo considerado uno de los resultados más notables de su carrera. Cuando en 1737, tras largas y amargas discusiones con Roma, fue finalmente posible levantar en la basílica de la Santa Croce de Florencia un mausoleo en su honor a la vista de todos, el sarcófago fue emplazado entre dos estatuas de mármol esculpidas por Vicenzo Foggini, que encarnan, respectivamente, la Geometría y la Astronomía. La figura exhibe un disco solar donde pueden reconocerse las manchas solares sobre las que Galileo había escrito en 1613, atributo equiparable al elogio inscrito en la tumba del también investigador del Sol Claude Lorrain. Así pues, científico y artista fueron homenajeados en sus respectivas sepulturas como extraordinarios estudiosos del Sol y sus diferentes manifestaciones.

El problema del deslumbramiento

Que la personificación de la Astronomía que se alza junto a la tumba de Galileo exhiba el Sol y sus manchas constituye un tributo a la abnegación asociada al estudio del astro. La invención del telescopio hizo del cielo un objeto de exploración. No sólo la Luna, Júpiter o la Vía Láctea merecieron un interés particular, sino también el Sol. No obstante, los que se dedicaron a observarlo corrían el constante peligro de convertirse en mártires de su propia pasión: pocas investigaciones sobre la naturaleza se habrán cobrado tantos ojos como las observaciones solares llevadas a cabo en los años 1611 y 1612. Todos hemos experimentado alguna vez la imposibilidad de mirar directamente al Sol a plena luz del día. Exagerando algo, podríamos decir que nadie ha llegado nunca a ver realmente el Sol: quien



1. **EN SU CUADRO *PUERTO CON LA VILLA MEDICIS*, realizado tres años después del retrato de Susterman, Lorrain recoge el momento en que aún puede resistirse la luz solar. Con una luz atenuada, el Sol sitúa al observador ante la decisión de exponerle su mirada o de proteger su rostro. Mientras que uno de los hombres situados en el extremo derecho del cuadro mira en la dirección del Sol naciente, cuyo disco se refleja sobre el agua trémula como un rayo de metal líquido, en primer plano, un segundo hombre, situado de pie en la orilla y vuelto hacia la dirección del Sol, cubre su rostro con un sombrero de ala ancha (óleo sobre lienzo, 1638).**

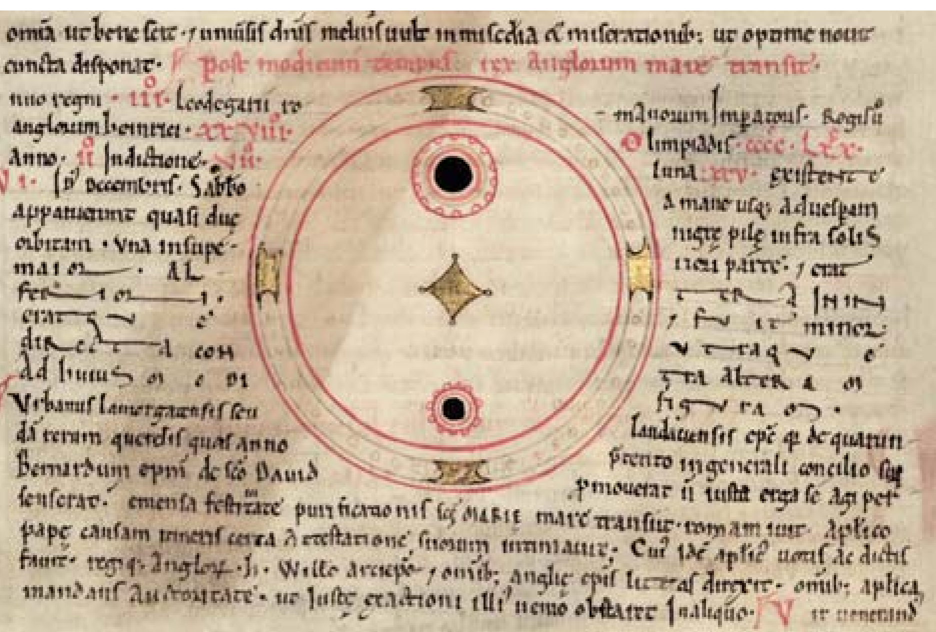
GALERIA DE LOS OFICIOS, FLORENCIA/*Sterne und Weltraum*

fija su mirada en él experimenta, junto con la molestia inmediata, un deslumbramiento que, tras un corto espacio de tiempo, conduce a la ceguera. Bastan dos minutos mirando fijamente al Sol para perder la vista.

Tamaño peligro se convirtió en dilema. Galileo se dedicó a la exploración telescópica del Sol desde el año 1611. El pisano relata cómo, en ese año, presentó durante su estancia en Roma ese fenómeno celeste a través del telescopio ante un público atónito. No obstante, para los participantes estaba claro que el precio a pagar por tal conocimiento podía ser la ceguera. Si bien esto fue lo que les sucedió a muchos durante la excitación de aquellos años, hoy en día no nos queda constancia de si la ceguera que Galileo comenzaría a padecer dos décadas más tarde fue o no una consecuencia a largo plazo de su observación de las manchas solares.

La pérdida de visión parece insinuarse en el formidable retrato de Galileo que Justus Susterman realizó en el año 1635 (*figura 4*): la luz acomete con tal fuerza el rostro del científico, que, o bien Galileo dirige la vista hacia una luz ficticia, o bien es incapaz de percibir en su totalidad la intensidad del haz luminoso. Si en el cuadro la luz no aparece en sentido simbólico, es que Galileo ya se había quedado total o parcialmente ciego. En cualquier caso, dado que la capacidad visual de Galileo se encontraba mermada en 1638, resulta evidente que el pintor recogió dicho trastorno y, al propio tiempo, lo convirtió en algo heroico; en efecto, al ser turbia su visión, Galileo es capaz de mirar fijamente a la luz. Semejante detrimento de la facultad visual deviene aquí símbolo de la capacidad para soportar la deslumbrante verdad que se esconde en el Sol.

Galileo se comporta como uno de esos personajes que, en los cuadros de Lorrain, parecen comprobar si son o no capaces de soportar la luz del Sol. Además de Lorrain, sólo William Turner lograría reflejar en sus obras las condiciones bajo las cuales el ojo humano puede resistir la luz solar. En su cuadro *Puerto con la Villa Medicis*, realizado tres años después del retrato de Susterman, Lorrain retrata ese momento en que aún cabe resistir la luz solar. Con una luz atenuada, el Sol sitúa al observador ante la decisión de exponerle la mirada



2. JOHN DE WORCESTER dibujó estas manchas solares en su *Crónica* del año 1128.

o de protegerse el rostro (*véase la figura1*). Mientras que uno de los hombres situados en el extremo derecho del cuadro mira en la dirección del Sol naciente, cuyo disco se refleja sobre el agua trémula como un rayo de metal líquido, un segundo hombre, vuelto hacia la dirección del Sol, en primer plano y situado de pie en la orilla, cubre su rostro con un sombrero de ala ancha.

Susterman no podía conocer el cuadro de Lorrain, pero sí era consciente de los problemas que implicaba la investigación del Sol. Su retrato parece una prueba de que Galileo, con los ojos abiertos y una mirada visionaria dirigida hacia la fuente de luz, nunca cubrió su rostro con un sombrero; no sólo como muestra de su anhelo de conocimiento, sino también de la disposición a pagar un precio por el mismo. Su mirada hacia el Sol y la consiguiente ceguera suponen un símbolo del valor con el que Galileo persiguió el conocimiento y que, a la postre, acabaría con su enjuiciamiento y condena.

Percepción antigua de las manchas solares

Las perturbaciones e irregularidades en la superficie del Sol que denominamos manchas solares constituían un fenómeno conocido desde hacía tiempo. Venían preocupando a los observadores del cielo, pues cuestionaban el punto de vista tradicional de la cosmología, basado en una concepción perfectamente armónica e inmaculada de los cuerpos celestes.

Las primeras referencias a la existencia de manchas en el Sol se remontan a la Antigüedad. Bajo condiciones meteorológicas apropiadas (por ejemplo, cuando una fina bruma mitiga la intensidad de los rayos solares o cuando el humo de un gran incendio enturbia el cielo), puede observarse el Sol —y con él, sus manchas— durante un largo espacio de tiempo, incluso cuando se halla en el cenit.

Cierto poeta sajón relacionó la gran cantidad de manchas solares que pudo verse entre finales del año 813 y principios de 814 con la muerte de Carlomagno, fallecido en enero de 814. El historiador Eginhardo vinculó una aparición de manchas solares que se prolongó durante ocho días con la muerte del emperador. En el año 1139 una capa de humo cubrió la región de Bohemia tanto, que pareció "como si la misma oscuridad del infierno hubiese sido espirada hacia aquí, para que los hombres pudieran sentirla; algunos incluso afirmaban haber visto una suerte de desgarrón en el Sol". Según un manuscrito ruso, en los años 1365 y 1371 hubo "un signo en el Sol: manchas negras, como si unos clavos se hubiesen incrustado en el astro".

Las primeras representaciones de manchas solares abundan en esa imagen de los clavos en el Sol. Cuenta John de Worcester en su *Crónica*, a propósito de las manchas solares del año 1128: "El 8 de diciembre [de 1128], al atardecer, aparecieron dos manchas oscuras sobre el disco solar. La de la mitad superior era mayor; la otra, en la mitad inferior del Sol, más pequeña". John de Worcester llegó incluso a elaborar un dibujo: "Se hallaban la una enfrente de la otra, como en este dibujo" (*véase la figura 2*).

Una representación impresionante de la época inmediatamente anterior a la invención del telescopio procede de un dibujo soberbio de la China del siglo XV (*véase la figura 3*). Muestra, en la parte superior izquierda, como si de los clavos aludidos se tratase, cinco manchas en torno a un centro dibujado de forma similar. Observaciones así tendrían lugar hasta la víspera de la invención del telescopio. De la siguiente manera refiere el artista Raffaello Gualterotti el crepúsculo del 25 de septiembre de 1604: "Vimos una gran cantidad de niebla, y se levantó un delicado y fino vaho que llenó el cielo; cuando el sol lo tocaba, el aire del oeste ofrecía el color de la sangre fresca. Dado que en esa época yo solía permanecer cada tarde en la Galería [los Uffizi] del venerable Gran Duque de Toscana [FernandoI], vi en el Sol poniente una mancha oscura de una extensión algo mayor a la de Venus. Pude ver esta mancha en el mismo lugar a lo largo de varios atardeceres: se encontraba entre el centro y el borde del Sol".

Los informes que hemos mostrado sobre manchas oscuras en el Sol que parecían alcanzar el espesor de clavos tuvieron un efecto

THE CHRONICLE OF JOHN OF WORCESTER. J. R. WEAVER (COORD.) PAG. 28; OXFORD 1908 (1989)/*SuW*

El autor

Horst Bredekamp es profesor de historia del arte en la Universidad Humboldt de Berlín. Se dedica a la época de Galileo.

inquietante y extraño. El fenómeno de las manchas solares atemorizaba y fascinaba de manera particular. Más significativos aún fueron los esfuerzos telescópicos entre los años 1611 y 1613 por aclarar qué había de real en esas manchas y "clavos", y desvelar, con ayuda del telescopio, su turbador secreto.

Sin embargo, con la introducción del telescopio, el problema de no poder mirar al Sol directamente acució a los investigadores con mayor urgencia. La casi mágica fuerza de atracción de las inquietantes apariciones de las manchas solares estimuló con tal fuerza a sucesivos investigadores, que se sobrepusieron a sus padecimientos corporales y encontraron formas de mirar el Sol sin sufrir lesiones.

Los dolores de ojos de los investigadores del Sol

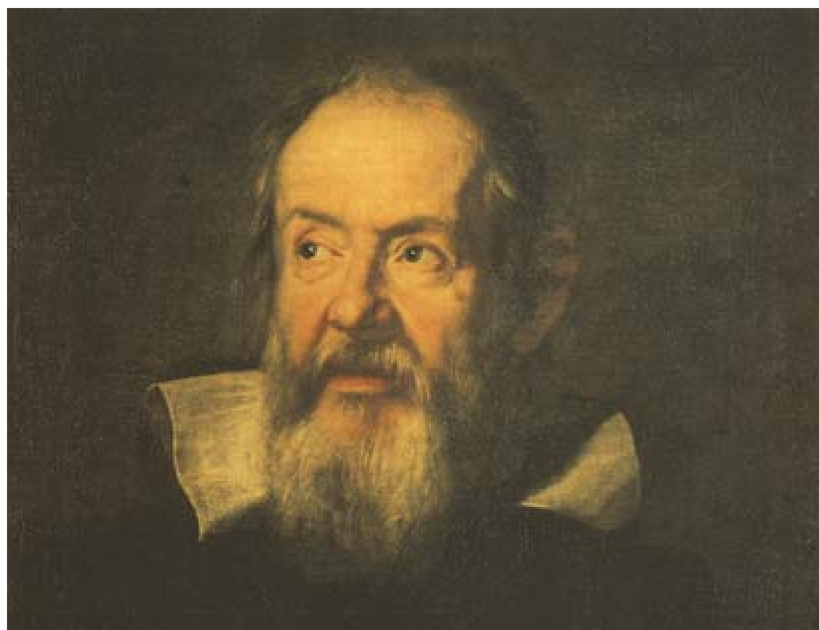
El uso del telescopio —predominantemente el holandés— se generalizó en toda Europa en el año 1609. Pero no fue hasta marzo de 1611 cuando un joven investigador dirigió su telescopio hacia el Sol con una curiosidad sistemáticamente controlada. No ocurrió en Roma, Padua o Praga, sino en Frisia Oriental. El 9 de marzo de 1611, Johannes Fabricius, hijo del pastor luterano e investigador del cielo David Fabricius, apuntó su telescopio hacia el Sol desde la torre de la iglesia del pueblo de Osteel. Las manchas oscuras que observó en el astro le hicieron pensar, en un primer momento, que "las nubes cercanas producen la sensación visual de manchas en el Sol". El conflicto entre la curiosidad y la protección del órgano capaz de satisfacer esa sed de conocimiento fue extremo para Fabricius: "Era de suponer, de todos modos, que una observación temeraria del Sol cuando se encuentra en lo alto del cielo podría acarrear serios daños en los ojos. Incluso los debilitados rayos del Sol del amanecer o del atardecer anegan el ojo en un extraño color rojo tal, que uno, no sin una adulteración de la sacrificada capacidad visual, a menudo ha de sufrirlo durante dos días". De ahí que insistiese en que los observadores del Sol procediesen con precaución, de modo que, "en la ejecución de esta experiencia, y ante un repentino ímpetu de los rayos solares, no inflijan daños a sus ojos durante el uso de lentes de aumento, y según convenga cada cual, comiencen con la menor cantidad posible de rayos de luz, hasta que la mirada pueda soportar al Sol en toda su circunferencia".

Así pues, el gozo de esos descubridores se dio de bruces con el dolor. Fabricius refiere que su padre y él se encontraban tan emocionados al caer la noche, que "sólo con esfuerzo éramos capaces de sobrellevar el intermedio nocturno". Pocas veces la emoción, capaz incluso de soportar fuertes molestias oculares, ha sido evocada de manera tan impresionante como en esa declaración de una noche de insomnio.

Tras Fabricius sería Christoph Scheiner, profesor de matemáticas y hebreo en el colegio jesuita de Ingolstadt, quien, junto a su asistente Baptist Cysat, tendría la ocurrencia de dirigir su telescopio hacia el Sol en un día de niebla. Su primer intento se remonta a marzo de 1611. También ellos pudieron observar, con gran asombro, la presencia de manchas solares. Sin embargo, sus ojos se resintieron y no repitieron sus observaciones hasta octubre del mismo año.

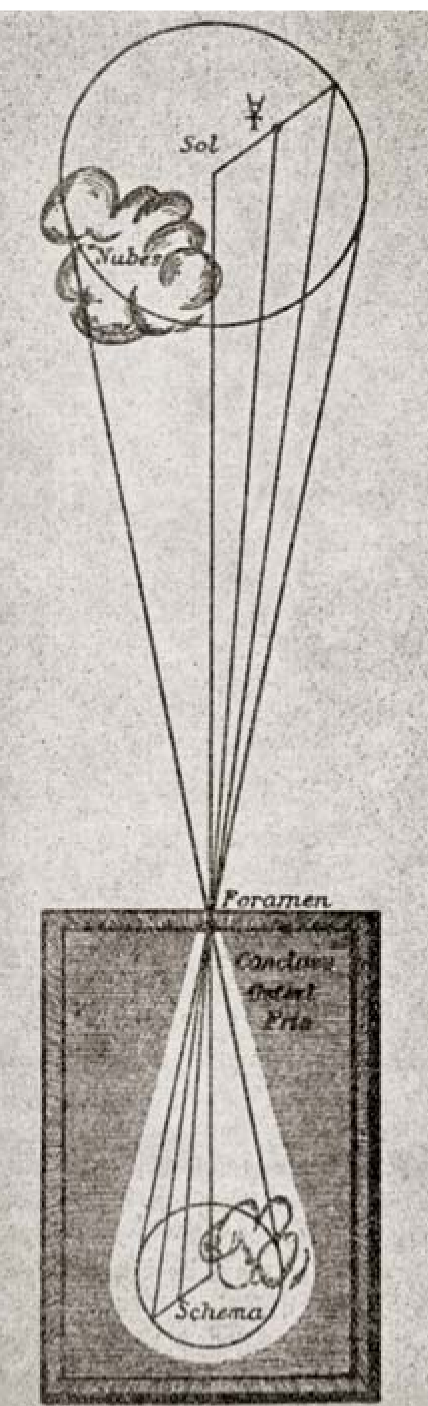


3. ESTA MINIATURA CHINA DEL AÑO 1425 muestra una formidable representación de las manchas solares.



4. SOLO ALGUIEN CUYOS OJOS YA ESTAN CEGADOS es capaz de mirar tan fijamente a la luz como hace Galileo en este retrato. Justus Susterman lo retrató como científico que no teme el sacrificio que entraña mirar de frente la luz de la verdad (óleo sobre lienzo, 1635).

(TOMADO DE *EAST ASIAN ARCHEOASTRONOMY: HISTORICAL RECORDS OF ASTRONOMICAL OBSERVATIONS OF CHINA, JAPAN AND KOREA*; ZHENTAO XU, DAVID W. PANKENIER Y YAOTIAO JIANG; NANJING UNIVERSITY LIBRARY, EARTH SPACE INSTITUTE SERIES, GORDON AND BREACH SCIENCE PUBLISHERS, N.º5, PAGS. 147-181; 2000); GALERIA DE LOS OFICIOS, FLORENCIA (*retrato de Galileo*)/SuW



5. LA CAMARA OSCURA diseñada por Johannes Fabricius para la observación solar.

DE MACULIS. JOHANNES FABRICIUS. WITTENBERG, 1611/*SuW*

Después de los intentos de Fabricius y Scheiner, fue Galileo el que, durante su estancia en Roma entre finales de marzo y junio de 1611, apuntaría con su telescopio hacia el Sol. También sus ojos resultaron afectados. Así lo menciona el jesuita Odo van Maelcote en carta dirigida en diciembre de 1612 a Johannes Kepler, en la que relata que tanto Galileo como otros investigadores alemanes habían conseguido observar el Sol de cerca con ayuda del telescopio; en cambio, él se había abstenido de continuar con las investigaciones porque le asustaba sobremanera la posibilidad de que el Sol le quemara los ojos.

El control de las observaciones

Las lesiones oculares hicieron surgir la duda de que la visión de manchas solares quizá no fuese sino una alucinación provocada por las propias molestias. Resulta sorprendente la forma en la que todos los que tomaron parte en esas observaciones intentaron objetivar las mismas; todos buscaron la supervisión de terceros.

Fue probablemente Johannes Kepler el primero que, ya en mayo de 1607 (es decir, con anterioridad a la invención del telescopio), hizo un pequeño agujero en el techo de la buhardilla de su casa de Praga por donde la luz solar se proyectaba sobre una hoja de papel, a modo de sencilla cámara oscura. En dicha proyección apareció una mancha negra. Kepler intentó verificar el fenómeno tratando de separar el efecto observado de las condiciones particulares en las que se había producido. Para asegurarse de que la mancha no había sido provocada por ningún objeto situado entre el papel y la abertura en el techo (por ejemplo, un cuerpo atrapado en una telaraña), Kepler repitió varias veces el experimento con distintos agujeros en el techo. Obtenía siempre el mismo resultado.

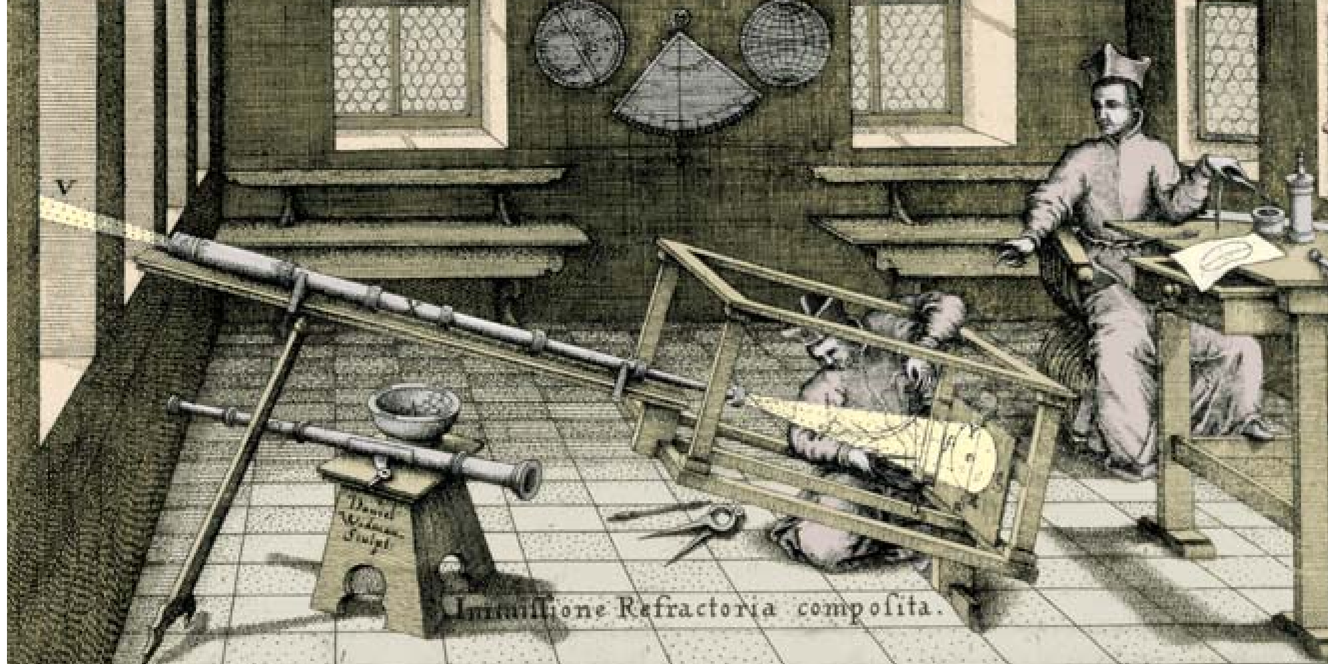
Una tercera persona presentó testimonio: “Yo, M. Martin Bachazek, que estuve presente durante tales observaciones, testifico haber [visto] así las cosas”. Se trataba del rector de la Universidad de Praga. “Dejamos que el sol entrase a través de un agujero redondo hecho en una lámina, con un diámetro del tamaño de la novena o décima parte de un pulgar, hasta una distancia de unos catorce pies del agujero, donde la figura alcanzó el presente tamaño. En la parte inferior izquierda de esa figura [en la imagen invertida] pudimos ver un punto, de un negro muy intenso en el centro y algo más tenue hacia el borde escarpado del mismo; tenía la apariencia y el tamaño de una pulga. Esto [era] nítido, y no sólo una vez: distaba más o menos un tercio del diámetro del borde exterior y más cercano”.

Mediante una cámara oscura simplificada y contando con la participación de un testigo independiente, Kepler cosechó un resultado libre de toda sospecha. Esa doble estrategia (es decir, que otra persona corroborase las observaciones y controlara la intensidad del sol mediante el uso de algún dispositivo) se convertiría en la directriz de los estudios posteriores.

El propio Johannes Fabricius ideó métodos que le permitieran controlar sus resultados. Su procedimiento consistía en volver a realizar las observaciones con diferentes telescopios y en recurrir a su padre en calidad de testigo, con quien conseguía que el ojo se acostumbrase poco a poco a la luz solar mediante una lenta observación paulatina del Sol, empezando por uno de sus bordes hasta terminar con el disco entero. Para evitar daños en la vista, David y Johannes Fabricius procedieron, como anteriormente ya había hecho Kepler, a utilizar una cámara oscura en una habitación sombría (*véase la figura 5*). A partir de ese momento, observaron que el movimiento de las manchas se hacía más lento conforme se acercaban al borde del disco solar y que, al mismo tiempo, se hacían más estrechas. Apoyado en ese comportamiento, Johannes llegó a la conclusión de que las manchas se movían sobre la superficie solar y que una gran mancha, tras desaparecer por el oeste, debía volver a emerger, diez días más tarde, por el lado este.

A finales de la primavera de 1611, Johannes Fabricius redactaba sus reflexiones acerca del desplazamiento de las manchas sobre la superficie del Sol. A éste, de acuerdo con las pruebas presentadas por Giordano Bruno y por Kepler, lo describía como un globo en rotación sobre su propio eje. Su padre, sin embargo, no se mostraría de acuerdo con dicha teoría. Por eso quizá, Johannes no envió a otros su libro y concibió su teoría como una mera propuesta que otros investigadores pudiesen desarrollar con posterioridad. Una actitud que supondría que su obra pasase inadvertida para los coetáneos. Kepler vio que Fabricius compartía su mismo punto de vista; sin embargo, sólo le dedicó un magro elogio.

Por su parte, Scheiner no volvería a sus observaciones solares hasta octubre de 1611. Llama la atención comprobar que él tuvo también que hacer frente a todo tipo de dudas. Dada la escasa fiabilidad de lo que aparecía ante sus ojos, los investigadores (y así procedió Scheiner en un primer momento) se preguntaron si el fenómeno no podría tener sus orígenes en cambios de las condiciones meteorológicas o en susceptibilidades del aparato telescópico, cuando no se trataría de un *oculorum vitio* (un “engaño de los ojos”). Con el objetivo de atenuar la luz del Sol, para que así las manchas



6. GRABADO DE DANIEL WIDMAN. Ilustra el uso de la *camera helioscopica* de Christoph Scheiner para estudiar las manchas solares sin peligro para los ojos.

no quedasen eclipsadas por el propio brillo del astro, Scheiner y sus compañeros aguardaban días de niebla o empleaban lentes ahumadas o coloreadas. Todos estos métodos podían fallar, por lo que Scheiner intentó verificar sus observaciones mediante variaciones y repeticiones de los experimentos, requiriendo, al mismo tiempo, que varias personas observasen por el telescopio para que posteriormente compararan sus resultados.

Por otra parte, Scheiner construiría una máquina que permitía una observación indirecta del Sol (*véase la figura 6*). La luz solar atravesaba un telescopio y caía sobre un tablero; sobre el mismo se proyectaban la imagen del Sol y las manchas. Scheiner modificaba y sustituía constantemente las lentes, pero todas las operaciones mostraban que "aun con distintos tubos, las manchas no se alteran jamás, como debería suceder en caso de que fuese el tubo el que provoca el fenómeno". Ante tales comprobaciones, Scheiner se convenció de que no existía artificio alguno, sino que se trataba de un fenómeno real, objetivo.

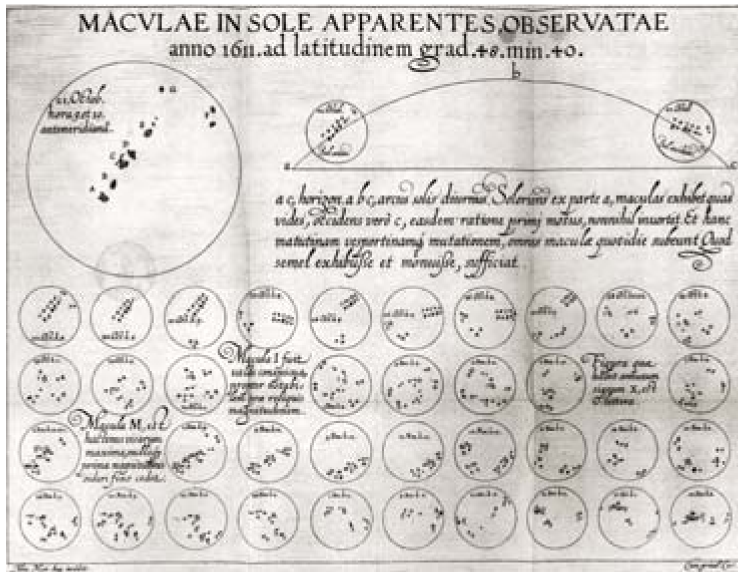
Galileo se valió de un dispositivo de características similares. Su alumno y amigo Benedetto Castelli hizo mención de una *camera helioscopica* en agosto de 1612. Ya en enero del mismo año, Georg Stengel informaba así a su hermano Karl en carta: "¿Has oído hablar de las manchas que hemos visto en el Sol? Es posible verlas de múltiples maneras: pues pueden ser vistas con el instrumento de Galileo cuando el Sol se esconde tras nubes no demasiado densas e incluso cuando el Sol brilla en toda su claridad. Para que los ojos no se escalden, se incorpora al aparato un espeso cristal azul verdoso. Y además, cuando la habitación se encuentra sumida en completa oscuridad y los rayos del Sol entran a través de una única pequeña abertura, del tamaño de una canica, y cuando éstos inciden sobre un papel en blanco en el otro extremo de la habitación, aparecen exactamente las manchas, [...] con sus verdaderos colores, [...] y pueden incluso ser copiadas". Con el uso de la *camera helioscopica*, que queda explícito en esta carta, se hizo posible documentar y recoger las manchas solares sobre papel; el dibujo y el grabado se convirtieron en métodos genuinos de la investigación solar.

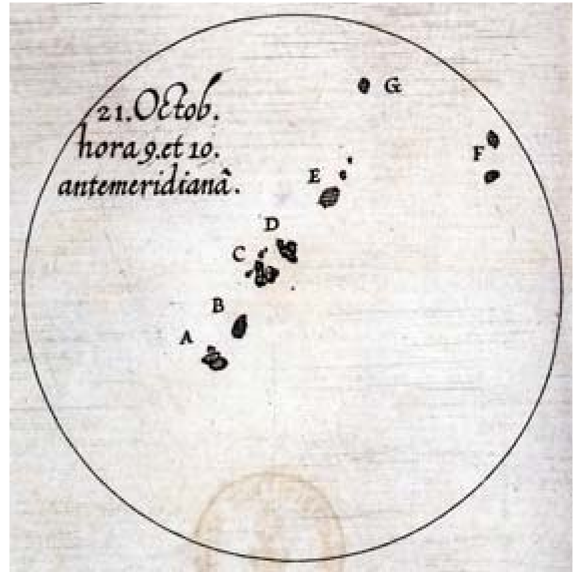
El arte de las manchas

Scheiner fue el primero en apreciar las posibilidades que ofrecía la visualización del fenómeno. Sus observaciones quedaron plasmadas en dibujos que en su primera publicación, el 5 de enero de 1612, salieron a luz en forma de láminas obtenidas a partir de grabados en planchas de cobre (*véase la figura 7*). En el círculo mayor, así como en los 39 menores, se recogen las manchas solares que pudieron verse entre el 21 de octubre y el 14 de diciembre de 1611. Se admitía que los grabados atestiguaban en favor de la opinión del propio Scheiner: que, si bien las manchas aparecían delante del Sol, no tenían nada que ver con el astro. Dado que, en su peregrinaje por el disco solar, las formas oscuras nunca regresaban a los mismos sitios, Scheiner supuso que no podían formar parte de la superficie solar, con lo que así rescataba la inmutabilidad del mayor de los cuerpos celestes.

Según puede apreciarse en el detalle ampliado del círculo mayor, Scheiner representó las manchas como agrupaciones compactas o apelotonadas. Que en los 39 círculos menores se diesen diversas configuraciones parecía confirmar que la imagen correspondía a cuerpos compactos situados entre la Tierra y el Sol, cuya apariencia cambiaba sólo debido a interposiciones interplanetarias que los cubrían parcialmente. Para Scheiner era esencial subrayar que la naturaleza de las manchas era

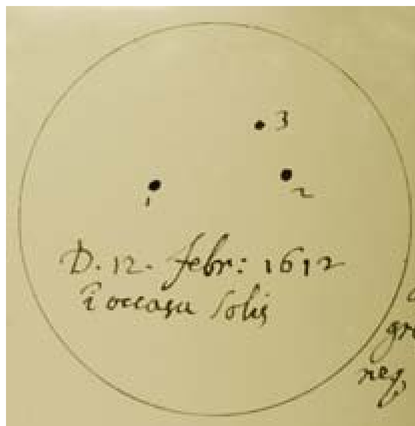
¿Eran las manchas solares una mera ilusión de las observaciones o existían realmente?



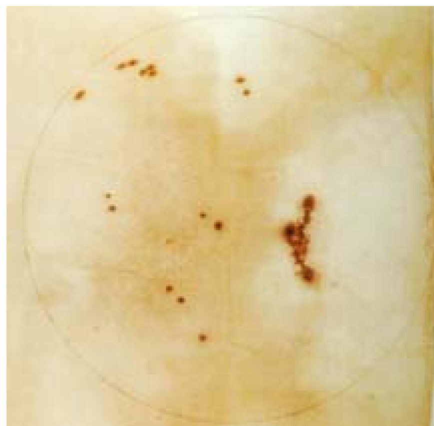


TRES EPISTOLAE DE MACVLIS SOLARIBVS. CHRISTOPH SCHEINER, PAG B4. AUGSBURGO, 1612/*SuW*

7. GRABADO DE ALEXANDER MAIR. Muestra las observaciones sistemáticas de las manchas solares llevadas a cabo por Scheiner en 1611 (*a la derecha: detalle del círculo mayor*).



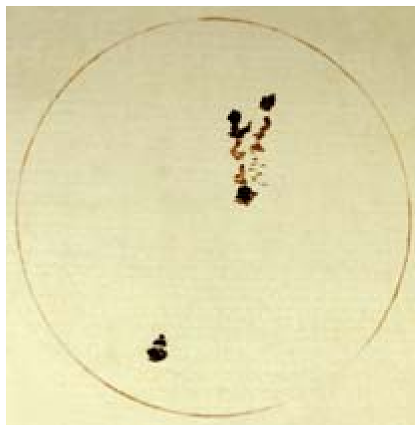
BIBLIOTECA NACIONAL CENTRAL DE FLORENCIA, GAL. 57, F. 68v/*SuW*





ROMA, BARB. LAT. 6479, F. 18r/*SuW*

9. EL 3 DE MAYO DE 1612 Galileo observaba estas grandes manchas solares (*izquierda; a la derecha: detalle, pincel sobre papel*).



BIBLIOTECA NACIONAL CENTRAL DE FLORENCIA, GAL. 57, F. 70r/*SuW*

8. GALILEO REPRESENTA en estos dos dibujos las manchas solares de los días 12 de febrero de 1812 (*arriba*) y del 1 de mayo del mismo año (*abajo, pincel sobre papel*).



10. ENVIOS A GALILEO de dibujos de manchas solares entre septiembre de 1611 y noviembre de 1612.

BIRGIT SCHNEIDER/TERRAFORMA/*SuW-Grafik*

ajena al Sol; para ello debía evitar en sus representaciones todo lo que pudiese apuntar a la presencia de niebla, figuras poco consistentes o conformaciones muy variables.

La publicación de Scheiner indujo a Galileo a comenzar su propia serie de dibujos sobre el fenómeno. El primero data del 12 de febrero; muestra tres manchas que Galileo numeró y distinguió con una anotación (*véase la figura 8, arriba*). Galileo iría desarrollando día a día nuevas técnicas cada vez más sutiles, hasta alcanzar un primer punto culminante el 1 de mayo de 1612 (*véase la figura 8, abajo*). Galileo incluye una figura con dos pequeñas ramificaciones que se despliegan hacia arriba. La hebra izquierda presenta, en sus dos extremos, cuerpos más oscuros, mientras que los elementos interpuestos entre ambos están representados con un tono más suave. El cuerpo inferior aporta una corona de puntos más claros. Por su parte, el tramo inicial de la rama de la derecha está compuesto por holgados trazos horizontales y aumenta de grosor hacia la parte superior, donde adquiere un color marrón intenso. Todas estas gradaciones tan sumamente delicadas permiten reconocer el empleo de un pincel fino, en sustitución de la pluma.

Al contrario que Scheiner, Galileo no obvió las variaciones internas de las manchas, sino que utilizó técnicas alternativas para destacarlas. Su estilo acentúa la propensión de las figuras a transmutarse, lo que implica una alternativa radical a la explicación de Scheiner.

A principios de mayo de 1612, Galileo había conseguido terminar nueve dibujos con la técnica expuesta; sólo por su diámetro (12,6 centímetros) supondrían ya un hito incomparable con respecto a las representaciones precedentes (*véase la figura 9*). La figura dominante (*detalle a la derecha*), que Galileo disecciona como si se tratase de un precursor de la teoría de los objetos fractales, se compone de tres colores. Domina el marrón oscuro, que marca la consistencia de la mancha. Se trata del mismo color que Galileo usó para dibujar las líneas finas, espaciadas una distancia minúscula, a la izquierda sobre la muesca interna y el cuarto de circunferencia bajo el círculo inferior. No se limita a dibujar puntos compactos, sino que retrata formas nebulosas y de consistencia poco definida.

Galileo era consciente de la importancia tanto de sus conocimientos teóricos como de sus habilidades pictóricas. En la carta adjunta que remitió el 2 de junio de 1612 a su amigo Maffeo Barberini (quien más tarde, ya convertido en el papa Urbano VIII, sería su adversario), Galileo se permite hablar, en sus dibujos, del "juicio final" del aristotelismo.

Dibujos que le supondrían el paso de las suposiciones a las pruebas. Pero no mostraban formas compactas, como Scheiner creía haber visto, sino objetos nebulosos y variables. Con ellos deseaba implantar mecanismos impersonales que permitiesen la comprobación del fenómeno a gran escala. En ese contexto se originó una correspondencia internacional entre investigadores del Sol que, desde distintos lugares, se comunicaban entre sí procedimientos y dibujos, para facilitar el seguimiento del fenómeno desde puntos muy distantes (*véase la figura 10*). En esta campaña participaron Domenico Passignano y Lodovico Cigoli, entre otros artistas.

El método lo había empleado Kepler: utilizar dispositivos y repetir las observaciones bajo diferentes condiciones y por personas distintas. Y lo amplió Galileo con una red que englobaba a toda Europa. Esta manera de investigar las manchas solares supuso la primera campaña internacional de investigación en tiempo real conocida en la historia de la ciencia. Se basaba en la objetivación mediante dispositivos, repeticiones, testimonios independientes y pruebas visuales. Gracias a su ingenio como dibujante, Galileo superaba a los demás investigadores en la representación de las observaciones.

Sólo los artistas, como su amigo Lodovico Cigoli, le igualaron. No nos olvidemos de las representaciones del Sol de Lorrain: sus discos solares muestran manchas en repetidas ocasiones, así en una escena portuaria de 1636, en la que el Sol aparece como una bola oscura que exhibe puntos y regiones borrosas. Lo mismo ocurre en un dibujo de la campiña vista desde la ciudad de Tivoli, realizado unos ocho años más tarde: en el disco solar, trazado en blanco, pueden apreciarse pinceladas de un color claro. Un tercer tipo de irregularidades aparece en un dibujo de 1642, en el cual el Sol exhibe un punto oscuro dibujado con pluma. También aquí se trata de manchas solares claramente perfiladas.

Los primeros pasos en la investigación telescópica del Sol estuvieron ligados a un enrojecimiento e inflamación de ojos, que en algunos casos condujo a la ceguera. Las imágenes del Sol en la obra de Claude Lorrain perseguían atrapar ese momento preciso en que el dolor de ojos se apoderaba de la capacidad de percepción. Lorrain, pintor y estudioso del fenómeno, consiguió de ese modo hacer explícito el punto neurálgico de toda investigación relativa al Sol. Del mismo modo, Galileo, investigador y buen dibujante, pudo, con su mano magistral, registrar la naturaleza de las manchas. En sus respectivas tumbas, ambos fueron justamente honrados como pioneros de la investigación solar.

Bibliografía complementaria

A REVISED CATALOGUE OF FAR EASTERN OBSERVATIONS OF SUNSPOTS (165 BC TO AD 1918). K. C. C. Yau y F. R. Stephenson en *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society*, vol. 29, págs. 175-197; 1988.

PICTURING OBJECTS IN THE MAKING: SCHEINER, GALILEO AND THE DISCOVERY OF SUNSPOTS. M. Biagoli en *Wissensideale und Wissenskulturen in der frühen Neuzeit*, dirigido por W. Detel y C. Zittel, págs. 39-96. Akademie; Berlín, 2002.

SOLEILS DE CLAUDE LORRAIN. Clélia Nau en *Aevum Antiquum*, n.º 3, págs. 235-262; 2003.

GALILEI, DER KÜNSTLER. EIN GESPRÄCH MIT HORST BREDEKAMP. Th. de Padova y J. Staude en *Sterne und Weltraum*, págs. 36-41; diciembre 2007.

CLAUDE LORRAIN — THE PAINTER AS DRAFTSMAN. DRAWINGS FROM THE BRITISH MUSEUM. R. Rand. Yale University Press; New Haven y Londres, 2007.

GALILEO AND SCHEINER ON SUNSPOTS 1611-1613. E. E. Reeves y A. van Helden. Chicago, 2009.

GALILEI DER KÜNSTLER. DER MOND, DIE SONNE, DIE HAND. 2.ª ed. H. Bredekamp. Akademie; Berlín, 2009.

Más duro que el diamante

Con altas presiones pueden conseguirse materiales sintéticos ultraduros con múltiples aplicaciones potenciales

Daniel Errandonea

CONCEPTOS BASICOS

- El diamante es la sustancia más dura e incompresible de la naturaleza. Junto con el nitruro de boro de estructura cristalina cúbica (c-BN), el abrasivo ultraduro más utilizado por la industria para cortar o procesar metales y cerámicas duras.
- Pero el diamante no es inalterable. Por eso se están desarrollando nuevos materiales ultraduros que compitan en dureza con el diamante y sean más estables química y térmicamente. La principal técnica para ello es la síntesis bajo altas presiones.
- Quizá dentro de poco, el nitruro de carbono cúbico y algunos de sus congéneres resulten tan comunes como el diamante.

Científicamente, se considera que un material es duro si se resiste a sufrir deformaciones plásticas o irreversibles. En una deformación irreversible, el material no recupera su forma original después de retirarse la carga que se le aplica. Las deformaciones implican el desplazamiento de átomos y la creación de defectos en el material. Se denominan materiales ultraduros (o superduros) aquellos que son casi indeformables; su arquetipo es el diamante.

Los materiales ultraduros reciben en la vida cotidiana múltiples aplicaciones. Mencionemos las herramientas de corte para la metalurgia, las brocas para las perforaciones en los pozos petrolíferos, la maquinaria para la construcción de carreteras, los recubrimientos protectores de los instrumentos de precisión, los recubrimientos de rodamientos y los de las superficies de los relojes de alta gama e incluso los polvos de los lavavajillas, las pastas de dientes y los implantes óseos. Como consecuencia de sus aplicaciones plurales, el mercado de los materiales ultraduros se encuentra en constante desarrollo y mueve grandes cantidades de dinero.

Tradicionalmente se utilizaron como materiales duros sustancias naturales: el diamante, el óxido de silicio (SiO_2) —uno de los componentes de la arena— o el óxido de aluminio (Al_2O_3). Durante el siglo XX se empezaron a producir de forma artificial, al propio tiempo que se creaban en los laboratorios nuevos materiales —el carburo de tungsteno, el nitruro de boro— que se fueron incorporando poco a poco a la actividad industrial.

El diamante es la sustancia más dura e incompresible de la naturaleza. Junto con el nitruro de boro de estructura cristalina cúbica (c-BN), el abrasivo ultraduro más utilizado por la industria para cortar o procesar metales y cerámicas de alta dureza. Sin estos materiales, muchas actividades industriales estarían muy limitadas. Su importancia es tal que, de acuerdo con la base de datos *World Mineral Statistics*, la comercialización de diamantes industriales reporta anualmente 50.000 millones de euros, una suma muy superior a la que genera la comercialización de gemas por parte de la industria joyera.

Uno de los inconvenientes del uso industrial del diamante estriba en el calentamiento de las herramientas durante el proceso de maquinado: provoca su deterioro progresivo, que se vaya convirtiendo en grafito y pierda, por lo tanto, sus propiedades mecánicas. Otro inconveniente se esconde en su reactividad con los materiales ferrosos, que produce su descomposición y la formación de carburos metálicos. Por ello, diversos laboratorios de distintos países se hallan afanados en el desarrollo de nuevos materiales ultraduros, con propiedades similares a las del diamante, aunque más estables química y térmicamente. No hace mucho, se han desarrollado materiales que compiten en dureza con el diamante y podrían convertirse



1. LOS MATERIALES ULTRADUROS se utilizan en la vida cotidiana en múltiples aplicaciones, por ejemplo en herramientas de corte en la metalurgia (*lámina de diamante sintético en el inserto*), brocas perforadoras, maquinaria de la construcción, recubrimientos de rodamientos, etc. Su arquetipo es el diamante (*arriba*).

CORTESIA DE K. DE HANTSETTERS, ALMAX INDUSTRIES (*fotografía diamantes*); http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Diamond_blade_very_macro.jpg (*lámina de diamante*)

en sus sustitutos para muchas aplicaciones en un futuro cercano. La principal técnica para la creación de nuevos materiales ultraduros es la síntesis bajo altas presiones.

Los diamantes no son eternos

El diamante es uno de los alótropos, o variantes estructurales, del carbono. No se conoce material natural más duro. Se debe a que en él los átomos de carbono forman enlaces covalentes (enlaces donde los átomos comparten uno o más pares electrónicos), muy cortos y estables; además, están dispuestos en la estructura cristalina del diamante de suerte tal, que dibujan una pirámide perfecta (*véase el recuadro* "Diagrama de fases del carbono"). Debido a esta disposición de los enlaces, los átomos de carbono crean en el diamante una red tridimensional simétrica y difícil de deformar. Sin embargo, a presión y temperatura ambiente la estructura estable del carbono es la del grafito (material blando usado para la fabricación de lápices), cuyos átomos de carbono forman capas independientes unidas por enlaces muy débiles, del tipo de Van der Waals (es decir, que no se deben a enlaces químicos covalentes o iónicos).

A diferencia del grafito, el diamante es un material metaestable (*véase el recuadro* "Diagrama de fases del carbono"): su formación requiere condiciones de presión y temperatura muy distintas de las dominantes en nuestro entorno; antes bien, se acercarían a las reinantes en el interior de la Tierra, a una profundidad de unos 300 o 400 kilómetros (decenas de gigapascal, es decir, cientos de miles de veces la presión atmosférica al nivel del mar, y miles de grados de temperatura).

Se supone que similares condiciones existieron en la corteza terrestre cuando se formaron los yacimientos diamantíferos. Presiones y temperaturas de este orden pueden conseguirse

también actualmente en los laboratorios. En 1954, la compañía General Electric producía los primeros diamantes artificiales. Desde entonces, se fabrican en gran escala.

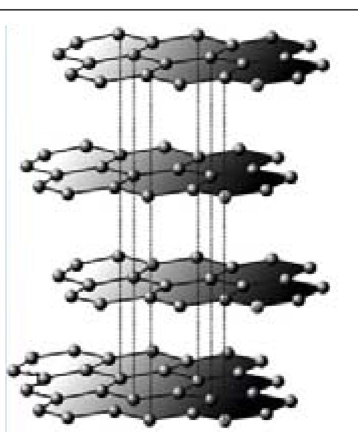
El diamante no es estable, sino metaestable, es decir, tiende naturalmente a convertirse en grafito. Sin embargo, esa descomposición es muy lenta, apreciable sólo a escala geológica. Pero cuando el diamante se calienta, su descomposición se acelera. A altas temperaturas se vuelve negro, se carboniza. Llega a consumirse por completo si el calor es lo suficientemente intenso; arde entonces como carbón común. Aquí reside la principal debilidad del diamante en sus aplicaciones, al margen de su elevado precio. Además, no es eterno. Por ello, durante décadas se le han buscado sustitutos artificiales. El principal objetivo de esta búsqueda es la mejora de la eficiencia y durabilidad de las herramientas y la maquinaria, con la consecuente reducción de costos.

Diseño científico de nuevos materiales ultraduros

La síntesis bajo altas presiones a escala industrial se aplica no sólo a la obtención de diamantes sintéticos, sino también a la producción de algunos de sus sustitutos, por ejemplo el c-BN. El nitruro de boro es un compuesto binario que consta de proporciones iguales de boro (B) y nitrógeno (N). Este compuesto es isoelectrónico con respecto al carbón (el B tiene tres electrones de valencia, el N cinco y, en promedio, el BN cuatro, como el C). Por ello, el BN presenta formas estructurales homólogas a las del carbón. En particular, el c-BN es estructuralmente similar al diamante. Tiene la ventaja de no reaccionar con los materiales ferrosos,

DIAGRAMA DE FASES DEL CARBONO



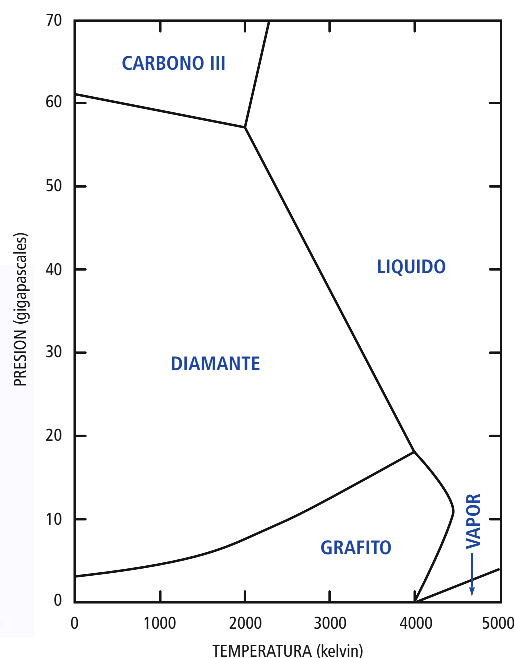


La aplicación de temperatura y presión transforma al grafito en diamante. Gracias al ordenamiento simétrico de los átomos de C el diamante tiene unas propiedades mecánicas extraordinarias. El diagrama de fases del carbono se muestra para ilustrar que el diamante es una estructura metaestable, es decir, que por naturaleza tiende a convertirse a presión y temperatura ambiente en otra, la del grafito, que en esas condiciones es la estable.

ALTA PRESION + ALTA TEMPERATURA







DANIEL ERRANDONEA; CORTESIA DE K. DE HANTSETTERS, ALMAX INDUSTRIES (*diamantes*); © *iStockphoto*/GOKTUG GURELLIER (*estructura diamante*)

aunque no es tan duro como el diamante. Sin embargo, su preparación hace necesaria la aplicación de presiones del orden de los 18 GPa (18 gigapascales, casi 180.000 atmósferas) y temperaturas superiores a los 1800 grados, lo que lo torna costosísimo.

Durante años se ha tratado de encontrar sustitutos del diamante y el c-BN. Las técnicas de altas presiones han desempeñado un papel muy importante en esa busca. En la última década, los estudios científicos a altas presiones han experimentado un desarrollo incomparable. Ahora se cuenta con nuevas técnicas experimentales e instrumentos que permiten la realización de experimentos refinados. Una posible vía para conseguir sustitutos del diamante y el c-BN es tratar de imitar al diamante mediante la combinación de carbono con otros elementos químicos, o incluso prescindiendo del carbono (*véase la figura 2*). Para ello es necesario someter a los elementos constituyentes del nuevo material a condiciones extremas de presión y temperatura.

La mayoría de los intentos por conseguir nuevos compuestos ultraduros están basados en la combinación de elementos livianos de la tabla periódica (C, B, N, etcétera). Un ejemplo es el nitruro de silicio (Si_3N_4) cúbico. Entre los compuestos ultraduros los hay que, como el BC_4, pueden ser más duros que el diamante; abren la puerta a un nuevo desarrollo de la industria metalúrgica. Otra posibilidad es el desarrollo de aleaciones de metales de transición (los elementos de los Grupos 3 a 11 o 12, de la tabla periódica) o el desarrollo de aleaciones ternarias, es decir, de tres elementos. Recientemente, se ha empezado a explorar la dureza de las nanoestructuras. Con estas ideas en mente, distintos laboratorios compiten por desarrollar potenciales sustitutos para el diamante.

Altas presiones y altas temperaturas

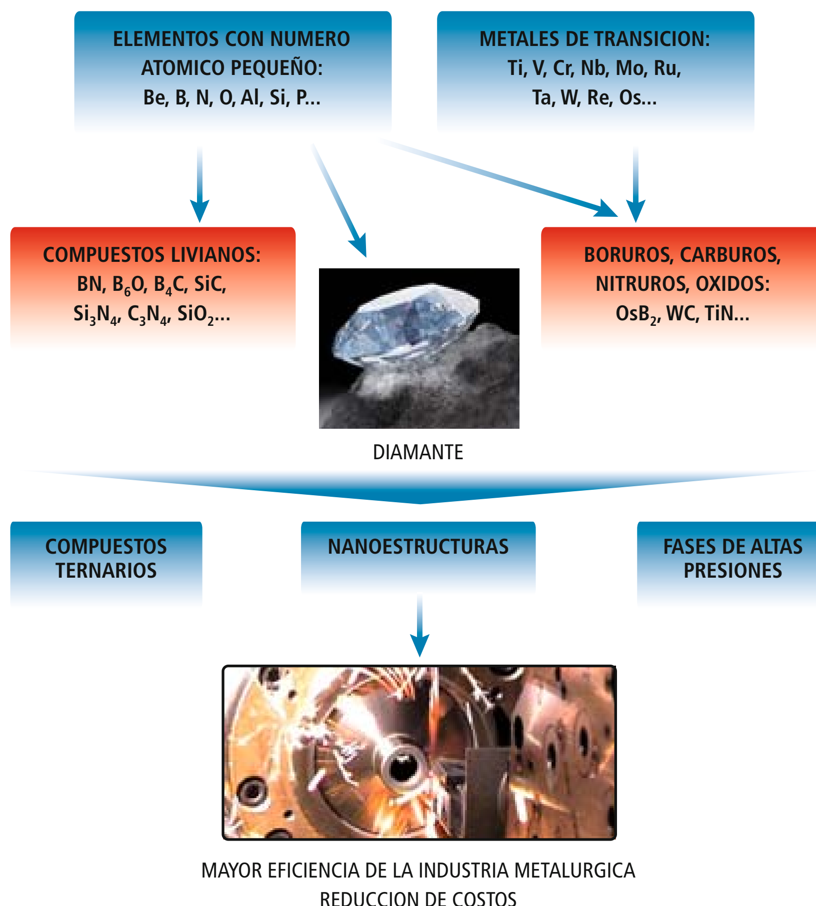
Las técnicas de las altas presiones han contribuido desde sus inicios al desarrollo de los materiales ultraduros. Al aplicarse presión y temperatura a un sistema, los enlaces químicos se pueden romper y reordenar luego, con nuevos enlaces. Así es posible formar nuevos compuestos. Además, en muchos casos la reactividad de los elementos químicos cambia bajo presión (por ejemplo, los gases nobles se vuelven reactivos); merced a ese fenómeno, se nos capacita para crear compuestos imposibles de conseguir a presión ambiente. Un ejemplo de ello es el tetróxido de xenón (XeO_4).

En la figura 3 se describe el proceso de síntesis de los compuestos ultraduros. Entregando energía (aumentando la presión y la temperatura) a un sistema de átomos que se encuentra en su estado estable, logramos que se reordenen y formen un nuevo compuesto o modifiquen su estructura cristalina. El sistema pasa así a una situación metaestable, es decir, una situación que se perderá con un cambio moderado de las condiciones. Sin embargo, en muchos casos, los compuestos o estructuras metaestables pueden recuperarse a presión y temperatura ambiente. De ese modo se consiguen nuevos compuestos a partir de sustancias o elementos más simples.

La determinación de las condiciones de síntesis requiere de un proceso combinado de cálculos teóricos y experimentos. En muchos casos, las condiciones idóneas de síntesis se determinan tras múltiples iteraciones teórico-experimentales. Afortunadamente, en el siglo XXI el desarrollo constante del poderío de cálculo y la disponibilidad de nuevos instrumentos, como las celdas de diamantes, facilitan el desarrollo acelerado de nuevos materiales. (Para una descripción de las celdas de diamantes, véase “Scheelitas a altas presiones”, por Daniel Errandonea; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre de 2007.)

Los nuevos favoritos de los científicos

El descubrimiento a finales del siglo XX de una estructura cúbica del nitruro de silicio

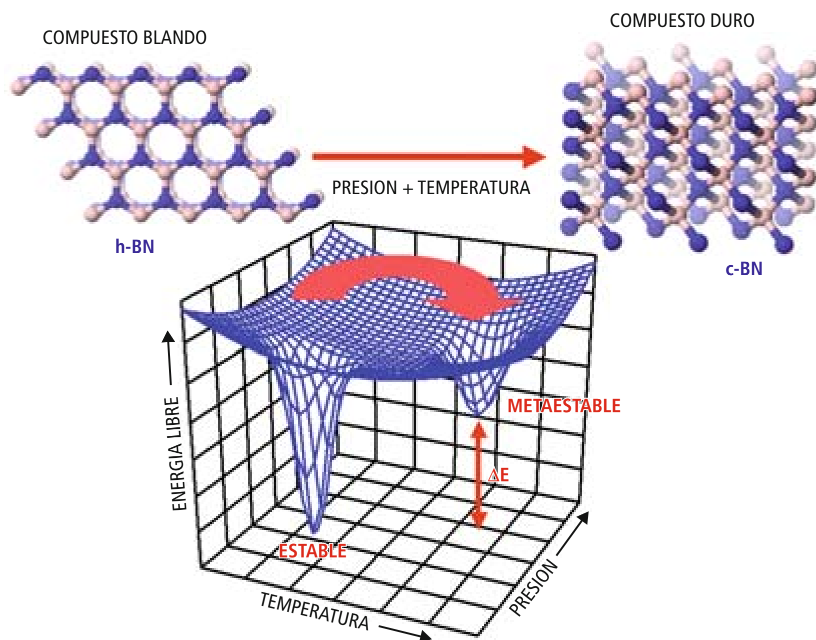


2. DISTINTAS RUTAS para la obtención de un compuesto ultraduro.

DANIEL ERRANDONEA; © iStockphoto/MARK EVANS (diamante)

El autor

Daniel Errandonea es profesor de física de la Universidad de Valencia y tiene una amplia experiencia en estudios bajo condiciones extremas de presión y temperatura. Errandonea trabaja para la Universidad de Valencia desde 2003 e integra el proyecto MALTA (http://www.malta-consolider.com) junto con investigadores de diversas instituciones académicas españolas. Su investigación ha sido galardonada con premios internacionales como el Alvin Van Valkenburg Award entre otros.



3. APLICANDO PRESION Y TEMPERATURA se consigue llevar a los átomos a una configuración diferente (metaestable, es decir, que con el tiempo tiende a volver al estado original). Se puede aprovechar esa nueva configuración (fase) si tiene mejores propiedades mecánicas. Un ejemplo es el nitruro de boro hexagonal (h-BN) —material blando análogo al grafito—, que bajo presión y temperaturas altas se transforma en c-BN, material duro análogo al diamante.

(γ-Si_3N_4) por investigadores del Instituto Max Planck de Maguncia y de otros grupos hizo de este compuesto, junto con otros similares, el modelo a abordar. El γ-Si_3N_4 tiene una estructura cristalina cúbica (*véase la figura 5*) similar a la del mineral espinela ($MgAl_2O_4$), pero los átomos de silicio ocupan las posiciones de los de magnesio y aluminio, y los de nitrógeno la posición de los oxígenos. En esa estructura cúbica, los enlaces químicos recuerdan a los enlaces entre carbonos del diamante. Una fracción de los átomos de silicio está rodeada por seis átomos de nitrógeno y la otra, por cuatro; se configura de este modo el mismo tipo de pirámides que los átomos de carbono crean en el diamante.

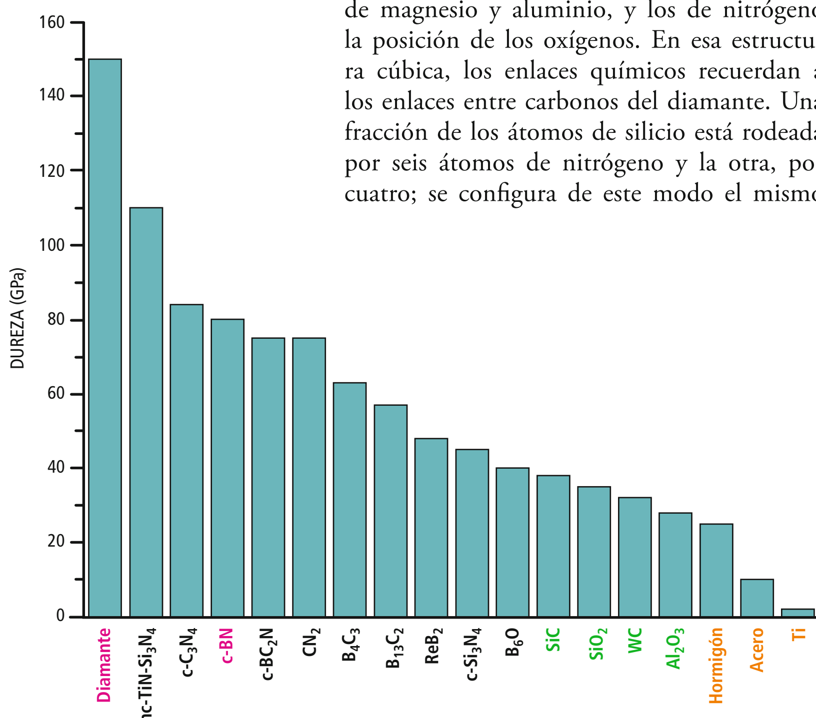
El γ-Si_3N_4, menos duro que el diamante y más que el óxido de silicio y el carburo de tungsteno, es tan incompresible como el c-BN. Por otro lado, el γ-Si_3N_4 ofrece la ventaja de no descomponerse a altas temperaturas, lo que lo ha vuelto un candidato para muchas aplicaciones industriales. Tras el descubrimiento del γ-Si_3N_4 se intentaron sintetizar otros nitruros con elementos del Grupo 14 de la tabla periódica (C, Si, Ge, Sn). El γ-Ge_3N_4 y el γ-Sn_3N_4 se sintetizaron en los años subsiguientes.

En la actualidad se sabe que la dureza de estos compuestos aumenta en el sentido γ-$Sn_3N_4 \rightarrow \gamma$-$Ge_3N_4 \rightarrow \gamma$-$Si_3N_4$; o sea, aumenta según disminuye el tamaño del átomo que acompaña al nitrógeno (Sn → Ge → Si → C). Esto sugiere que el γ-C_3N_4 (c-C_3N_4) debería ser más duro que los otros nitruros cúbicos ya conocidos.

Hay cálculos teóricos que predicen que el γ-C_3N_4 podría alcanzar la dureza e incompresibilidad del diamante, si no superarlas. Pero ciertos datos recientes indican que sus propiedades se encuentran a mitad de camino entre las del diamante y las de c-BN. Si sumamos a ello su potencial estabilidad a altas temperaturas, nos hallaremos ante una opción óptima para reemplazar a ambos compuestos en diversas aplicaciones. El γ-C_3N_4 sólo se ha producido a pequeña escala en el laboratorio y muchas de sus propiedades necesitan aún ser estudiadas. Pero no sería de sorprender que en el futuro se vuelva un material habitual en nuestra vida diaria.

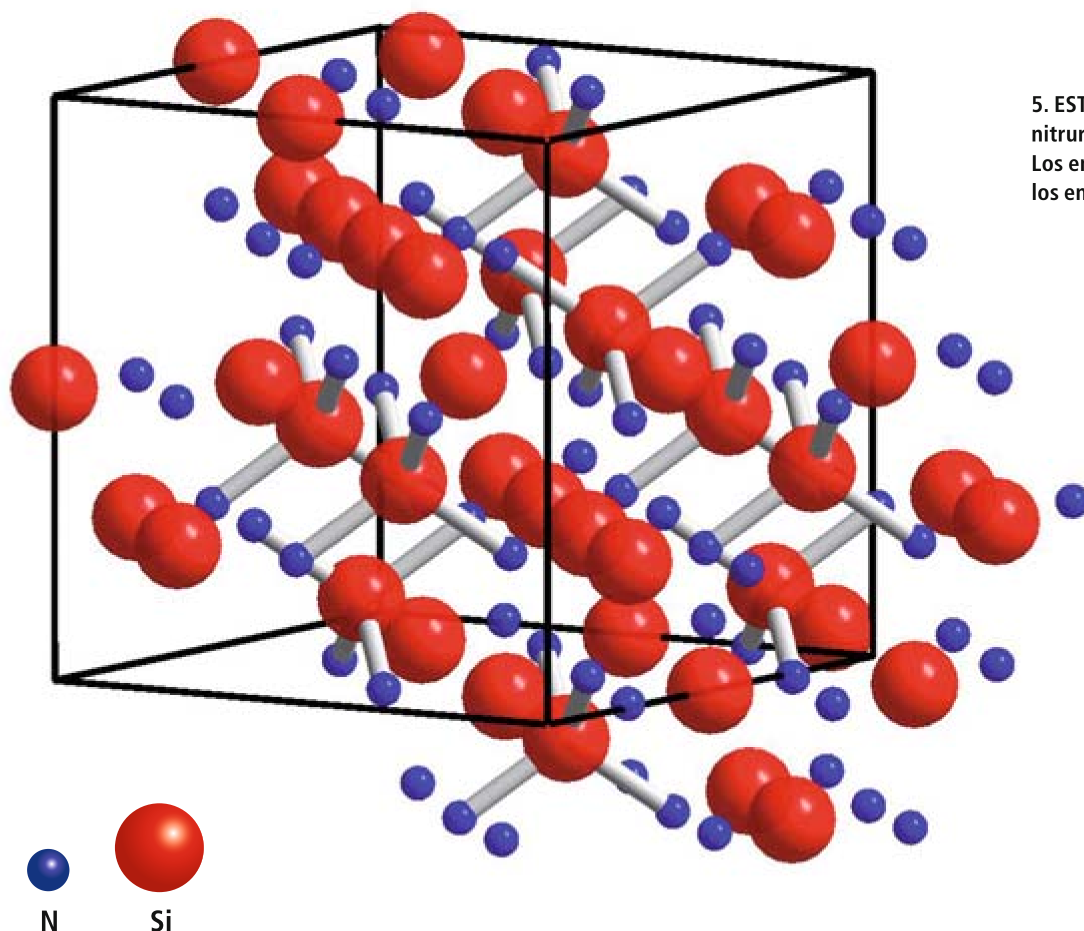
Otras familias de compuestos que están recibiendo atención como posibles sustitutos del diamante y del c-BN son las aleaciones de boro, carbón y nitrógeno. Otras estructuras cúbicas —las del BC_2N, el B_4C_3 o el CN_2— compiten en dureza con el nitruro de boro cúbico. El origen de la dureza de esa serie de compuestos se encuentra en la fortaleza de los enlaces C-N y B-N. Por otro lado, los enlaces P-C, P-N y P-O podrían ser más fuertes que los enlaces precedentes, de lo que se infiere que el fósforo podría ser un buen candidato para la creación de materiales ultraduros. Esa posibilidad, ahora en estudio, no ha arribado todavía a resultados sólidos.

Son objeto también de intensa investigación los nitruros de metales de transición (OsN_2,



4. DUREZA DE DISTINTOS MATERIALES (en unidades del Sistema Internacional) comparados con el diamante y el c-BN. Algunos materiales industriales se muestran con letras en verde. Otros materiales más familiares para el lector se muestran con letras en naranja.

DANIEL ERRANDONEA



5. ESTRUCTURA CRISTALINA del nitruro de silicio cúbico (γ-Si_3N_4). Los enlaces Si-N se asemejan a los enlaces C-C del diamante.

DANIEL ERRANDONEA (*arriba*); CORTESIA DE D. DZIVENKO (TU, DARMSTADT) (*nitruro de zirconio*) Y DE G. SERGHIOU, UNIVERSIDAD DE EDIMBURGO (*aleación*)

PtN_2, IrN_2, MoN, TaN, Zr_3N_4, NaReN) y los boruros análogos (ReB_2, OsB_2). Se trata se materiales que pueden producirse a presiones relativamente bajas, característica apreciable de cara a su fabricación industrial.

Del ReB_2 y algunos otros se ha llegado a sostener que son menos compresibles y más duros que el diamante. Sin embargo, estos resultados han sido cuestionados por varios investigadores. Las particulares propiedades mecánicas de estos boruros y nitruros están basadas en el tipo de enlace químico entre sus átomos constituyentes. Así, el PtN, descubierto en el Laboratorio de Geofísica de los EE.UU. calentando platino bajo una atmósfera de nitrógeno en una celda de diamantes, tiene el mismo tipo de enlaces que el diamante, el c-BN y el γ-Si_3N_4. En este caso, cada átomo de Pt está rodeado por cuatro átomos de N formando el mismo tipo de estructuras piramidales que dibujan los átomos de carbono en el diamante.

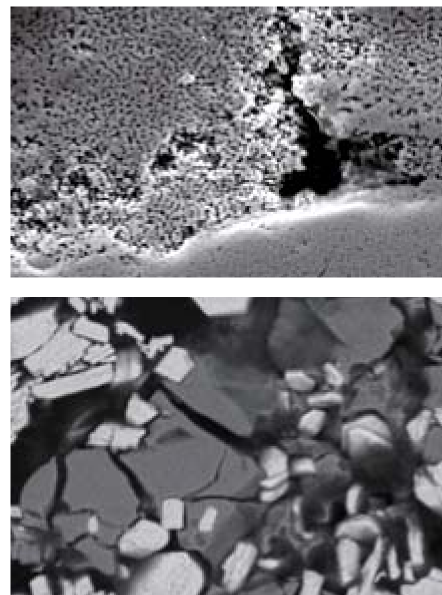
En compuestos como el ReB_2, la dureza proviene del alejamiento de los átomos del metal de transición (es decir, el renio, Re) de su posición original en alrededor de un 5 %; en los huecos que deja este desplazamiento se insertan átomos ligeros (B o N). Estos átomos forman enlaces covalentes muy cortos y fuertes con los metales de transición, de ahí la suma dureza de las aleaciones.

Dureza e incompresibilidad

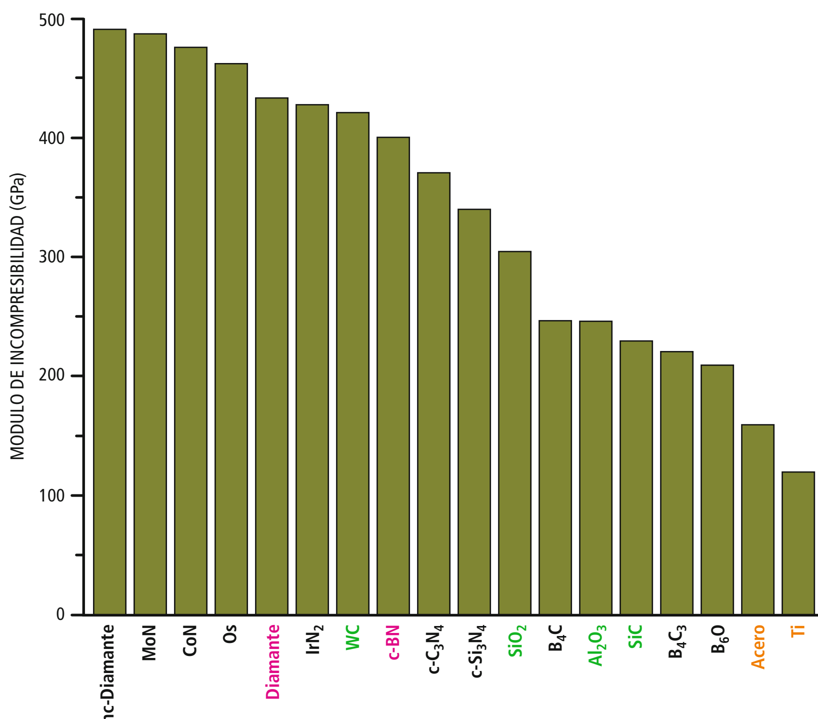
Hay dos propiedades físicas que caracterizan a los materiales ultraduros, la dureza y la incompresibilidad. La primera de ellas es una propiedad mecánica de los materiales consistente en la dificultad de deformarlos o crear marcas en su superficie; la segunda se refiere a la resistencia que presenta una sustancia a una compresión uniforme (la disminución del volumen al aplicar una presión igual en todas las direcciones), que se mide con el "módulo de incompresibilidad".

En general, ambas magnitudes se hallan correlacionadas. Cuanto más incompresible un material, más duro es. Cuando se produce un nuevo material ultraduro en un laboratorio, suele ser sólo en cantidades microscópicas (unos pocos miligramos). Por lo tanto, es imposible someterlo a las pruebas necesarias para determinar su dureza. Sin embargo, con celdas de diamantes y difracción de rayos X resulta posible determinar el módulo de incompresibilidad incluso cuando sólo se dispone de cantidades ínfimas de un nuevo compuesto. Los esfuerzos se centran en encontrar materiales tanto o más incompresibles que el diamante, esperando que también sean más duros (es decir, menos deformables). Sin embargo, esto no siempre resulta así. Un ejemplo de ello es el metal osmio.

La mayoría de los nuevos compuestos ultraduros desarrollados en los laboratorios alcanzan



6. COMPUESTOS ULTRADUROS. Nitruro de zirconio cúbico (c-Zr_3N_4) (*arriba*) y una aleación de Na-Re-N (*abajo*). Fotografías tomadas con el microscopio electrónico de barrido.



7. MODULO DE INCOMPRESIBILIDAD de distintos materiales (en unidades del Sistema Internacional) comparados con el diamante y el c-BN. Algunos materiales industriales se muestran con letras en verde. Otros materiales más familiares para el lector se muestran con letras en naranja. El nuevo diamante nanocristalino es el material menos compresible.

una dureza y una incompresibilidad notables. Pero no se han conseguido verdaderos rivales de entidad para el diamante en lo que se refiere a sus propiedades mecánicas (aunque sí con respecto a su estabilidad térmica o química). Existen nuevos materiales más incompresibles que el diamante, como el MoN, el CoN y el propio metal osmio. Sin embargo, la dureza de los dos primeros es aún desconocida y en el caso del osmio su dureza es inferior a la del diamante.

Tendencias futuras

En la búsqueda de nuevos compuestos ultraduros se tiende a combinar las altas presiones con la nanotecnia. Un equipo de investigadores de la Universidad de Bayreuth han creado agregados de nanopartículas de diamante aplicando altas presiones a moléculas de C_{60}. Cada agregado tiene unas dimensiones de 20 nanómetros de diámetro y 1 micrometro de longitud. La presión aplicada es de 20 GPa y la temperatura, 2500 grados. Parece que este nuevo material (nc-diamante, donde nc significa "nanocristalino") es al menos un 20 % más incompresible que el diamante común (*véase la figura 7*) y también mucho más duro. Las condiciones para su preparación son similares a las del c-BN, las adecuadas, pues, para la producción industrial del nc-diamante.

Otra posibilidad que se empieza a explorar es la creación de materiales ultraduros que consten de sucesivas capas de distintos compuestos. Con ese método se puede prevenir el movimiento de los defectos de un material y, de ese modo, evitar su deformación y aumentar su dureza. Se han hecho pruebas con capas alternadas de Si_3N_4 y TiN (nc-TiN-Si_3N_4); los resultados son muy prometedores (*véase la figura 4*). Una posibilidad interesante que será explorada en el futuro es la creación de capas de nitruro de carbono, C_3N_4.

Muchas otras posibilidades siguen inéditas. No se ha tomado en consideración el elemento más ligero que puede formar estructuras tridimensionales, el berilio. Se debe, muy probablemente, a su toxicidad, que obliga a usar equipamientos especiales. El berilio debe manipularse con mucho cuidado, extremando las precauciones cuando se genere polvo de berilio, ya que la exposición prolongada al mismo provoca cáncer de pulmón. Sin embargo, las fases ternarias de Be con distintos elementos livianos (B, C, N, O) podrían tener propiedades de interés. En la industria metalúrgica se emplea el Be como endurecedor en aleaciones metálicas, especialmente de cobre.

Algunos de los materiales ultraduros preparados en los laboratorios, como el γ-Si_3N_4, importan no sólo por su dureza, sino también por sus propiedades semiconductoras. En la industria de los semiconductores se están realizando pruebas del γ-Si_3N_4 como recubrimiento protector transparente. Otros materiales, por ejemplo el BC_5, además de ultraduros, serían superconductores de alta temperatura. Y los hay, como el CoN, que presentan propiedades magnéticas aprovechables. Las potenciales aplicaciones de los nuevos materiales sintetizados en laboratorios no terminan aquí; se van ideando sin solución de continuidad. Mencionemos, a modo de ejemplo, las nuevas formas poliméricas del nitrógeno, que tienen una dureza superior a la del c-BN y sirven para almacenar energía.

Gracias a las técnicas de altas presiones hay todo un nuevo mundo por descubrir en lo que se refiere a los materiales ultraduros y sus aplicaciones. Los miembros del proyecto MALTA —que reúne a doce grupos de investigación de las altas presiones— intentamos contribuir a su exploración. No falta mucho para que hablemos del nitruro de carbono cúbico y de algunos de sus congéneres con la misma familiaridad con que ahora lo hacemos del diamante.

DANIEL ERRANDONEA

Bibliografía complementaria

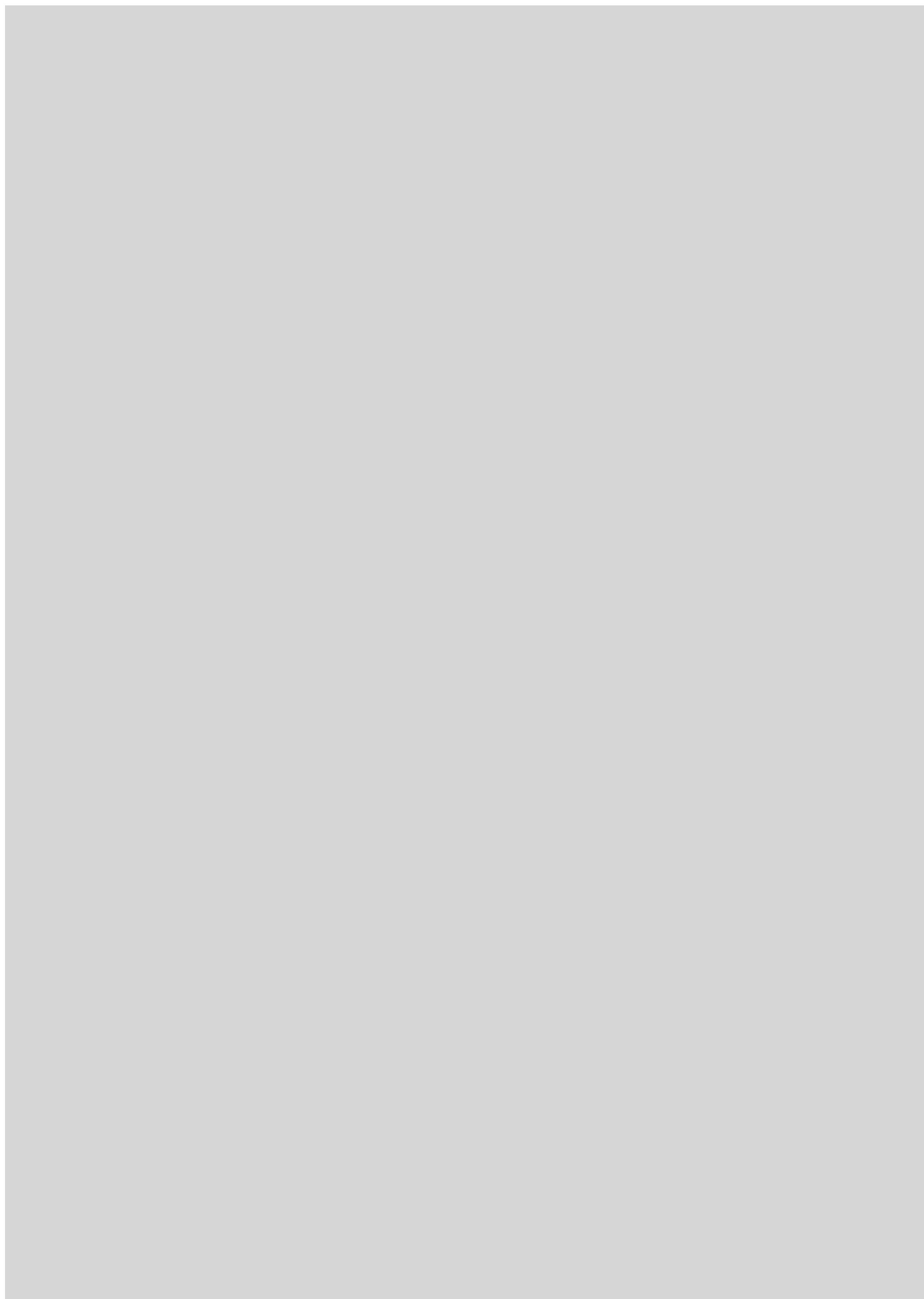
SYNTHESIS AND DESIGN OF SUPERHARD MATERIALS. J. Haines et al. en *Annual Review of Materials Research*, vol. 31, págs. 1-23; 2001.

NEW MATERIALS FROM HIGH-PRESSURE EXPERIMENTS. P. F. McMillan en *Nature Materials*, vol. 1, págs. 19-25; 2002.

RECENT ADVANCES IN NEW HARD HIGH-PRESSURE NITRIDES. A. Zerr et al. en *Advanced Materials*, vol. 18, págs. 2933-2948; 2006.

STATE OF ART AND RECENT TRENDS IN BULK CARBON NITRIDES SYNTHESIS. G. Goglio et al. en *Materials Science & Engineering Reports*, vol. 58, n.º 6, págs. 195-227; 2008.

SUPERHARD PHASES OF SIMPLE SUBSTANCES AND BINARY COMPOUNDS OF THE B-C-N-O SYSTEM: FROM DIAMOND TO THE LATEST RESULTS. O. O. Kurakevych en *Journal of Superhard Materials*, vol. 31, n.º 3, págs. 139-157; 2009.



Privacidad e Internet cuántica

Gracias a algunas de las más extrañas leyes de la física, tal vez podamos algún día buscar o navegar por la Red sin que nadie vaya recopilando datos nuestros

SETH LLOYD

CONCEPTOS BASICOS

- En la actualidad, las búsquedas por la Red, incluso las anónimas, revelan información personal sobre el usuario.
- En una Internet cuántica, los buscadores devolverían al usuario sus peticiones y las respuestas correspondientes, con plena garantía de que nadie habría guardado o copiado sus datos.
- Las búsquedas cuánticas exigirán que las bases de datos de los motores de búsqueda se funden en memorias de nuevo tipo, que ya se están ensayando en el laboratorio.

Salvaguardar la intimidad está resultando difícil en estos tiempos, y más aún en Internet, donde cada vez que entramos en Google nuestros datos quedan registrados para la posteridad, o cuando menos, para los anunciantes.

Las compañías de navegación por Internet aseguran que la privacidad de sus clientes está garantizada, porque encriptan su información personal y son identificados por números, no por nombres, para conservar el anonimato. Lo malo es que este proceder no siempre resulta eficaz. La usuaria de AOL número 4417749 hubo de saberlo a su costa. En 2006, AOL decidió hacer pública "en línea" una lista de 20 millones de búsquedas en la Red, entre ellas, las de esta usuaria y las de otras 657.000 personas más. Un análisis de los contenidos de esas búsquedas permitió a unos reporteros localizar a una señora de 62 años, residente en Lilburn, Georgia, viuda, de nombre Thelma Arnold. Por fortuna, la exposición pública de su identidad y de sus intereses íntimos no le resultaron a esa señora demasiado embarazosos. ¿Cuántos de nosotros podríamos decir lo mismo?

Las leyes de la física pudieran, no obstante, acudir en nuestra ayuda. La comunicación a través de "canales cuánticos" especiales está permitiendo ya que bancos y otras instituciones envíen datos con encriptaciones prácticamente invulnerables. Por tanto, ya existe la tecnología necesaria para tornar opacas nuestras búsquedas a fisgones que pudiesen interceptarlas. Pero en el futuro, una nueva versión "cuántica" de Internet quizá pueda facultarnos para formular peticiones y recibir respuestas con la certeza de que nadie, ni siquiera Google, sepa los pasos que hemos dado. Además, las mismas técnicas que garanticen la privacidad de la búsqueda también podrán asegurarla durante todo el tiempo que permanezcamos conectados.

Los motores de búsqueda guardan y analizan los datos de los usuarios para poder ofrecerles publicidad bien orientada. Es su forma de cubrir gastos y obtener beneficios. Si decidieran mantener secretos los datos de los usuarios, los navegadores habrían de buscar un nuevo modelo de negocio. Y los usuarios tendrán que decidir si están dispuestos a pagar por buscar lo que les interese, o si



MICROZOA *Getty Images*; SCIENTIFIC AMERICAN (*logo del ordenador*)

prefieren hacerlo sin costo y revelar qué es lo que buscan.

Un auditorio atípico

Me sentía un tanto fuera de lugar cuando en la primavera de 2004 me vi en un banquete de multimillonarios durante un congreso celebrado en Monterrey, California. Mi papel, hasta donde se me alcanzaba, era el del payaso que sale por sorpresa de la gran tarta: entretener a comensales interesados en técnicas cuánticas. Entre los multimillonarios presentes se contaban Sergey Brin y Larry Page, los fundadores de Google. Para mi sorpresa, Brin y Page tenían buenos conocimientos sobre información cuántica. Tras algunas osadas especulaciones sobre las formas en que la física cuántica podría cambiar las interacciones de la gente a través de Internet, les sugerí que mis colaboradores y yo podríamos investigar sobre "búsquedas cuánticas en Internet", fuese tal cosa lo que resultara ser.

La capacidad de la física cuántica para proporcionar una privacidad completa emana de un hecho sencillo: los sistemas cuánticos (desde las partículas elementales hasta las moléculas) existen en multiplicidad de estados. En un instante dado, un átomo puede hallarse en varios lugares; una partícula de luz (fotón) puede estar polarizada vertical y horizontalmente; el momento magnético de un electrón puede apuntar hacia arriba y hacia abajo, y así sucesivamente. En consecuencia, mientras los bits clásicos (a diferencia de los cuánticos) sólo pueden registrar el valor 0 o el valor 1, los bits cuánticos (qubit, de "quantum bit") pueden registrar 0 y 1 a la vez. Además, cuando un bit cuántico toma simultáneamente los valores 0 y 1, no es posible efectuar una copia exacta del mismo: todo intento modifica el estado del bit. Esta regla, el teorema de no clonación, resulta válida también para las secuencias (o ristras) de bits cuánticos, que pueden representar, por ejemplo, palabras o frases. En consecuencia, quienes fisguen en un canal cuántico (en general, una fibra óptica portadora de fotones en múltiples estados de polarización) no podrán "escuchar" la comunicación sin perturbarla y, de ese modo, hacer patente la intrusión.

Existen distintas técnicas de encriptación cuántica para el intercambio de datos con absoluta privacidad, fundadas en la imposibilidad de la clonación. Dichas técnicas presumen, no obstante, que a los destinatarios les esté permitida la lectura de los datos que se les envían; de nada serviría enviar a Google una petición de búsqueda encriptada. No obstante, en 2008,

SINFIN DE APLICACIONES

Una futura Internet cuántica permitiría que los usuarios interaccionasen de formas imposibles con la técnica actual.

En elecciones con múltiples candidatos, la **votación cuántica** (los votantes expresan todas sus preferencias entre todas las posibles comparaciones por pares), favorecería al candidato preferido por el máximo número de votantes.

En las **subastas cuánticas** se maximizaría el número de compradores que logran adquirir lo que desean a un precio que consideran justo.

Los ordenadores cuánticos del futuro descargarán **software cuántico** "desechable" (a demanda) para resolver ciertos problemas a velocidades inalcanzables por los programas determinísticos ordinarios.

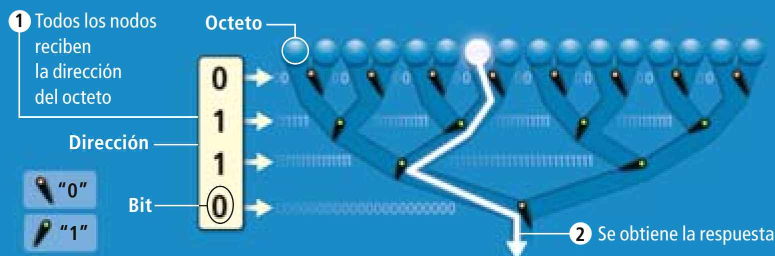
En un futuro lejano, una Internet cuántica podría permitir incluso el **teletransporte** de objetos materiales.

¡Chitón! ¡Ni una palabra!

Para ofrecer privacidad absoluta, los motores de búsqueda tendrán que almacenar en una RAM cuántica la información relativa al contenido de la Red. Los usuarios enviarán peticiones compuestas en un único "paquete cuántico". La RAM cuántica añadirá las respuestas al paquete y lo devolverá. Cualquier perturbación del estado cuántico del contenido advertirá al usuario de que se ha vulnerado el secreto. La RAM cuántica requiere una arquitectura de "cadena de cubos", distinta de la clásica.

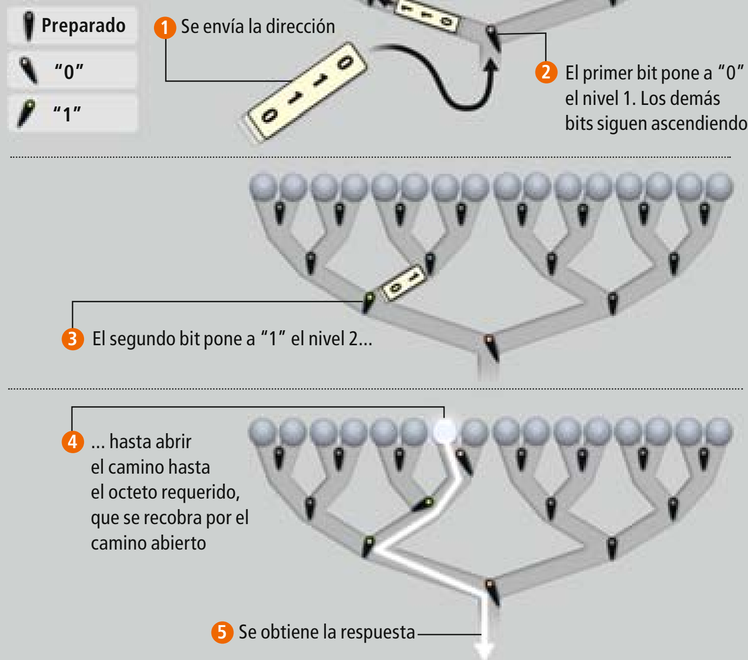
RAM CLASICA

Los datos, constituidos por octetos de bits ("bytes"), se organizan en una estructura dendriforme. Para acceder a un octeto es necesario accionar todos los conmutadores en cada nivel de bifurcación. Tal proceder no resulta viable en una RAM cuántica: la tasa de errores sería inaceptable debido a la fragilidad de los estados cuánticos.



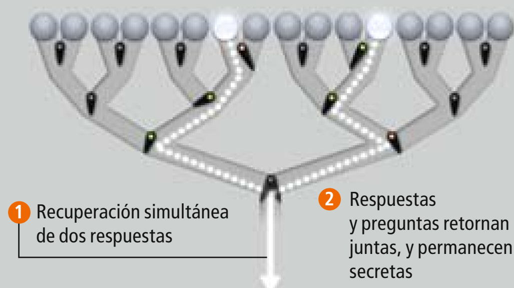
RAM EN "CADENA DE CUBOS"

En este diseño, se llega a un octeto accionando los nodos de una sola senda.



RAM CUANTICA

En la RAM cuántica en "cadena de cubos" se abren dos caminos para recobrar dos octetos de datos, de modo que pueden remitirse junto con las preguntas originales.



JEN CHRISTIANSEN

descubrimos junto con Vittorio Giovanetti, de la Escuela Normal Superior de Pisa, y Lorenzo Maccone, de la Universidad de Pavía, que el teorema de no clonación también hace posibles las indagaciones de carácter reservado. En el protocolo que hemos ideado, el usuario debe tener la capacidad de enviar al buscador una "pregunta cuántica", una hilera de bits cuánticos que contiene simultáneamente la pregunta auténtica y otra más. (No importa cuál sea la segunda pregunta, el ordenador del usuario podría incluso generarla automáticamente al azar.)

El buscador consulta su base de datos para ofrecer respuesta a las preguntas dobles del solicitante y combina preguntas y respuestas en un nuevo paquete cuántico, que devuelve al usuario. Si el motor de búsqueda efectuase una copia de esas preguntas, para registrarlas en sus archivos, el usuario sabría que no se ha respetado su privacidad, porque el estado cuántico de las preguntas originales habrá sido perturbado en formas detectables por su ordenador. Y algo de crucial importancia: el motor de búsqueda puede suministrar respuestas sin detectar físicamente —y no digamos, clonar— la ristra de bits cuánticos que codifica las preguntas y, por tanto, sin conocimiento de cuáles fueron éstas.

Aunque todos esos procesos mágicos son imposibles con los ordenadores, bases de datos y redes disponibles en la actualidad, nos dimos cuenta de que no eran técnicamente inalcanzables. El primer requisito para efectuar búsquedas cuánticas privadas consiste en una Internet cuántica rudimentaria. Existe ya la tecnología para el intercambio de mensajes cuánticos por líneas dedicadas a ese fin, y se está utilizando para comunicaciones seguras. Sin embargo, una Internet a plena escala no puede consistir en una línea tendida entre dos puntos: ha de ser una red cuyos nodos encaminen de tal modo los paquetes de datos, que cualquier usuario pueda llegar hasta cualquier otro o acceder a cualquier servidor de la Red. Resulta que el direccionamiento de paquetes de datos sin efectuar copias temporales —y sin sufrir, por ello, las consecuencias del teorema de no clonación— constituye una tarea nada trivial, que exige una técnica compleja todavía en fase experimental: el enrutador cuántico. Es posible que un prototipo de una red tal se halle disponible en el plazo de cinco a diez años.

El segundo requisito para efectuar búsquedas de carácter reservado en la Red es que los usuarios y los servidores de datos se hallen dotados de ordenadores cuánticos rudimentarios, es decir, ordenadores con capacidad de almacenar y procesar bits cuánticos.

Desafortunadamente, los bits cuánticos son sumamente volubles y propenden a perder de forma espontánea, en fracciones de segundo, su multiplicidad de estados. Hasta ahora, las computadoras cuánticas experimentales, que almacenan bits cuánticos en los estados magnéticos de iones suspendidos en el vacío, almacenan sólo en torno a 8 bits a la vez. Un ordenador cuántico a plena escala exigiría la conservación de centenares, por no decir miles, de bits cuánticos, hazaña que probablemente dista varios decenios, incluso como prototipo experimental. Por fortuna, si la finalidad consiste en efectuar búsquedas privadas, unos 30 bits cuánticos podrían ser suficientes, pues una petición de 30 bits, debidamente codificada, permite extraer respuestas unívocas de una base de datos integrada por más de mil millones de referencias. Esos "microprocesadores cuánticos" de 30 bits podrían estar disponibles en un plazo de cinco a diez años.

Memoria no tan aleatoria

Hasta ahora todo presenta buen aspecto: las búsquedas cuánticas privadas exigen solamente ordenadores cuánticos sencillos y sistemas cuánticos de comunicación. Ahora, lo difícil. Para responder a una pregunta cuántica compuesta, la base de datos del motor de búsqueda debe suministrar de forma simultánea la respuesta de cada componente. Para lograrlo será necesario un nuevo tipo de almacenamiento de datos llamado "memoria cuántica de acceso aleatorio", o QRAM.

La memoria RAM es un dispositivo para el almacenamiento de datos con estructura dendriforme. Cada elemento de datos consiste en una secuencia de ocho bits que componen un octeto (byte) que posee una dirección, la cual corresponde, a su vez, a otra secuencia de bits. Los datos son como las hojas del árbol: su dirección especifica la ruta que lleva desde el tronco hasta esa hoja en particular. El primer bit de la dirección determina cuál de las dos ramas se ha de tomar en el nivel más bajo del árbol; el segundo controla la bifurcación de segundo nivel, y así de forma sucesiva. El número de ramas del árbol se duplica en cada nuevo nivel; en una RAM estándar (clásica) con direcciones de 30 bits, la recuperación de un dato exige efectuar 2^{30} conmutaciones (más de 1000 millones).

Se podría diseñar una versión cuántica de esa RAM. La única diferencia es que los conmutadores que encaminan la información a través del árbol binario deben poder dirigirla por dos ramas a la vez, porque cada bit de una pregunta cuántica puede especificar dos rutas. Tales conmutadores cuánticos pueden construirse mediante técnicas ya existentes, como los espejos semitransparentes que "escinden" fotones (les hacen seguir dos caminos a la vez). El problema es que los circuitos cuánticos son extraordinariamente sensibles al ruido y a los errores: bastaría una confusión en sólo uno de los conmutadores para perder la privacidad del bit correspondiente. Dado que un bit de dirección típico controla un gran número de conmutadores, las probabilidades de pérdida de privacidad serían muy elevadas.

Giovanetti, Maccone y el autor acertamos con un plan distinto para direccionar la RAM (clásica o cuántica) que requiere un número muchísimo menor de conmutadores en cada acceso a la memoria. El secreto consiste en encaminar los bits de dirección por las mismas ramas del árbol que habrán de seguir los datos, en lugar de hacerlo por líneas de direccionamiento separadas. Dado que los bits se transfieren de forma secuencial a través de la matriz de memoria, hemos dado en llamarla "cadena de cubos" ("bucket brigade"), por analogía con las que se formaban para apagar incendios.

En la arquitectura "cadena de cubos" se acciona sólo un único interruptor en cada nivel de la matriz de memoria, mientras que en la RAM "clásica" deben accionarse todos los de cada nivel. Las economías obtenidas son impresionantes: en una RAM "cadena de cubos" que contase con 1000 millones de posiciones de memoria sólo habría que accionar 30 conmutadores en cada acceso a la memoria; en la RAM al uso es necesario que actúen los 1000 millones. Las ventajas de la arquitectura "en cadena", tanto en ahorro energético como en tasa de errores, crecen de forma exponencial con el número de bits.

¿Futuro cuántico?

Creíamos al principio que la idea de la "cadena de cubos" revolucionaría la industria de las memorias RAM. Empezaron a revolotear por nuestra cabeza visiones con signos de dólar. No tardamos en comprobar que otros habían ideado diseños parecidos antes que nosotros y que, en cualquier caso, el sistema resultaba demasiado lento para la RAM clásica (aunque sería una solución para ahorrar energía en memorias no volátiles, como las utilizadas en las cámaras digitales).

El diseño en cadena de cubos resultaría, en cambio, crucial en las búsquedas cuánticas, puesto que su arquitectura tolera tasas de error de una parte en 30, en lugar de una en mil millones. El medio material de una QRAM consistiría en un soporte físico estándar. Los datos se almacenarían, por

El autor

Seth Lloyd es profesor de ingeniería mecánica (o un "mecánico cuántico", como gusta describirse) en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, donde dirige el Centro W. M. Keck de Teoría de Información Cuántica Extrema. Ha desarrollado uno de los primeros modelos teóricos de computación cuántica; trabaja con varios grupos para construir ordenadores y sistemas de comunicación cuánticos. Su libro *Programming the Universe* fue publicado por Knopf en 2004.

Otra solución: distorsionar el perfil de usuario

A finales de 2008 se alcanzaban casi los 187 millones de páginas Web. El acceso a esta inmensa fuente de información no sería posible sin la ayuda de los motores de búsqueda en Internet: Google, Yahoo, Microsoft Live Search y muchos otros. El motor devuelve al usuario una lista de resultados con los enlaces a las direcciones que contienen información sobre los términos deseados.

El 68 por ciento de los usuarios seleccionan un enlace dentro de la primera página de resultados; un 92 por ciento dentro de las tres primeras páginas. Un motor de búsqueda ofrecerá un mejor servicio si su respuesta sitúa en las primeras páginas los enlaces que mejor se ajustan a los intereses del usuario. Sin embargo, conocer los intereses de los usuarios no es tarea fácil, pues el término buscado puede tener significados distintos (términos ambiguos). Por ejemplo: si buscamos "Mercurio" podemos referirnos al planeta del sistema solar o al elemento químico.

Puesto que el usuario no facilita sus intereses de forma explícita, los motores de búsqueda de Internet intentan obtenerlos de forma implícita. El método más utilizado corresponde a la construcción del perfil de usuario a partir de las consultas enviadas.

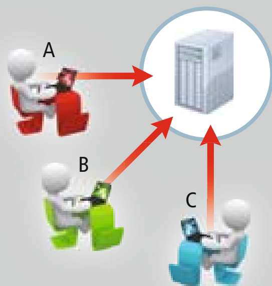
Aunque la creación del perfil de usuario se utilice para ofrecer un mejor servicio, también permite mostrar publicidad acorde con las preferencias del mismo. Es razonable suponer que una buena personalización del servicio aumentará el número de usuarios y los beneficios que se deriven de la publicidad. Sin embargo, ello puede atentar contra la privacidad, dado que los términos buscados pueden ser privados y personales. Por ejemplo: si un usuario ha realizado una bús-

INTERCAMBIO DE BUSQUEDAS

Imaginemos tres usuarios: A, B y C. Cada uno quiere hacer dos búsquedas en la Red: A quiere preguntar "tenis" y "fútbol" (le interesan los deportes), B quiere preguntar "adelgazar" y "dieta" (le interesa perder peso) y C quiere preguntar "café colombiano" y "café arábigo" (le interesa el café). Puesto que el motor de búsqueda deduce el perfil de cada usuario a partir de sus búsquedas, una forma de "engañar" al motor consiste en intercambiar las preguntas. Para ello, los usuarios se ponen en contacto mediante un servidor central que crea un grupo de usuarios (*1*). Se establece luego una red "por pares", en la que se produce una repartición aleatoria de las preguntas, que se envían al motor de búsqueda (*2*). Por fin, se intercambian las respuestas. El motor asocia cada usuario a sus preguntas, pero al estar éstas "contaminadas", obtiene perfiles distorsionados (incorrectos o inexactos) (*3*).

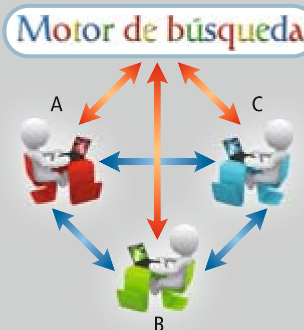
❶ Los usuarios se ponen en contacto mediante el servidor

A quiere preguntar "tenis" y "fútbol"
B quiere preguntar "adelgazar" y "dieta"
C quiere preguntar "café colombiano" y "café arábigo"



❷ Los usuarios intercambian sus preguntas y las envían al motor

A pregunta "adelgazar" y "dieta"
B pregunta "tenis" y "café arábigo"
C pregunta "café colombiano" y "fútbol"



❸ Se obtienen perfiles de usuario distorsionados

... a A le interesa perder peso
... a B le interesan los deportes y el café
... a C le interesan los deportes y el café

ejemplo, en miles de millones de diminutos espejos, como los que componen la superficie de un CD. La parte cuántica de la QRAM corresponde a la matriz de conmutación, que se construiría a partir de conmutadores con capacidad de encaminar bits cuánticos a lo largo de las dos ramas al mismo tiempo. Esos conmutadores cuánticos ya existen; logran tasas de error lo suficientemente reducidas para construir una QRAM con mil millones de alojamientos o más.

Indiscutiblemente, es muy probable que el ensamblaje de conmutadores cuánticos para formar una gran RAM cuántica resulte difícil, por no mencionar el problema de conectar una QRAM a los canales de comunicación cuántica necesarios para llevar a la práctica las búsquedas privadas. Pero ninguna de esas dificultades parece insalvable. De paso, hemos visto que las técnicas de enrutado de datos pensadas para nuestro diseño de RAM cuántica podrían aplicarse a las redes de conmutación de la Internet cuántica en su conjunto. De ese modo se podría navegar por la Red en completo anonimato, sin revelar lo que se busca ni los sitios que se visitan.

Dos o tres meses después de que hubiéramos puesto en claro los detalles de la construcción de una RAM cuántica y de cómo realizar en la Red indagaciones totalmente privadas, coincidí con Brin y Page en un congreso en Napa, California. En una gran cuba de agua caliente resguardada por higueras, mientras las estrellas rodaban sobre nuestra cabeza, les expliqué cómo funcionaban las búsquedas cuánticas y las ventajas que podrían ofrecer. Su primera

queda de cierto lugar, podemos suponer que vive allí; si el término buscado corresponde a una enfermedad podemos deducir que el usuario, o alguien próximo, la padece.

Una forma de conseguir privacidad y un buen tiempo de respuesta consiste en distorsionar el perfil de cada usuario mediante la adición de consultas de otros usuarios: se obtiene así una "identidad de grupo". El motor de búsqueda sólo puede crear un perfil de grupo, por lo que le resulta imposible identificar a un usuario individual. En nuestro grupo de investigación hemos desarrollado dos métodos para preservar la privacidad basados en este enfoque.

La primera de nuestras propuestas se sirve del intercambio aleatorio de consultas. Cada vez que un usuario quiere realizar una consulta contacta con un nodo central que recibe todas las peticiones. Una vez ha recibido un número prefijado de peticiones, ese servidor central crea un grupo de usuarios. A partir de ese momento, los usuarios establecen entre ellos una red de comunicaciones "por pares" (el nodo central no puede acceder a sus mensajes).

Los miembros del grupo ejecutan un protocolo criptográfico, a través del cual obtienen una consulta de otro usuario sin saber la identidad del mismo. A continuación, realizan la consulta al motor de búsqueda y devuelven la respuesta al grupo. Al añadirse al perfil de un usuario consultas que no son suyas, el perfil quedará distorsionado. Este sistema de encriptación se ha ensayado en un entorno real; ofrece un tiempo de respuesta competitivo. Esperamos tener una versión disponible para los usuarios en abril de 2010.

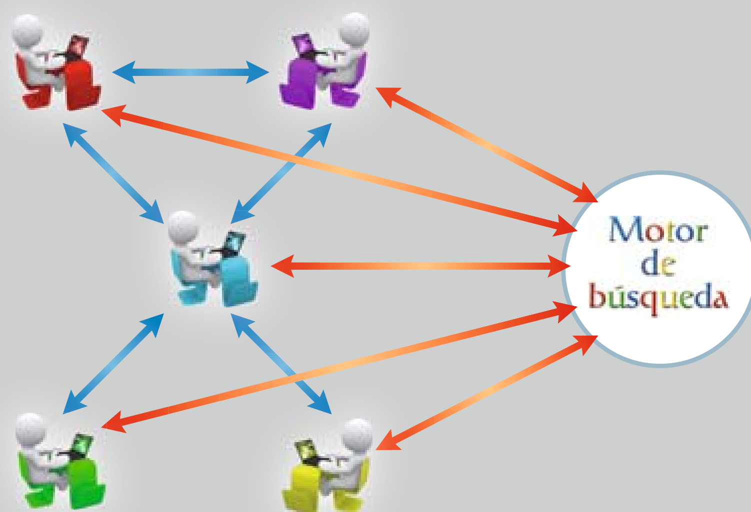
Nuestra segunda propuesta se sirve de las redes sociales. Los usuarios establecen una conexión con sus contactos de la red social. La conexión se realiza fuera de la red social, para evitar que ésta pueda acceder a los mensajes de los usuarios. Cuando un usuario quiere realizar una consulta, la envía a uno de sus amigos de la red social. Este amigo puede enviar la consulta al motor de búsqueda o a uno de sus amigos. El proceso se repite hasta que un usuario decide enviar la consulta al motor de búsqueda. La decisión de enviar la consulta al motor de búsqueda o a un vecino corresponde al protocolo de privacidad diseñado. La respuesta sigue el camino inverso y llega hasta el usuario que generó la pregunta.

Este sistema, basado en redes sociales, mejora el tiempo de respuesta. Además, el perfil colectivo, aunque esté ofuscado, será más próximo al del usuario original, ya que los amigos de un grupo posiblemente compartirán intereses. Por consiguiente, los resultados que devolverá el motor de búsqueda serán de mayor calidad.

Alexandre Viejo
y Jordi Castellà-Roca
Departamento de ingeniería
informática y matemáticas
Cátedra UNESCO de Privacidad de Datos,
Universidad Rovira i Virgili

REDES SOCIALES

Otra forma de preservar la privacidad en las búsquedas en la Red se basa en una aplicación de tipo red social. Los usuarios, previamente interconectados mediante esta aplicación, intercambian las preguntas con sus "amigos" y las envían al buscador. Finalmente, la respuesta se entrega al usuario que ha generado la pregunta.



respuesta fue que el modelo empresarial de Google se basaba en conservar información sobre todas las solicitudes y utilizarla para priorizar la publicidad y los resultados de búsquedas futuras. No habían considerado la posibilidad de no conservar la información. Cuando les expuse las ventajas de un nuevo modelo de negocio, basado en facturarles a los usuarios los resultados de las búsquedas, se lo pensaron un poco más. "Veamos si puede usted construirlo", dijeron.

Eso es precisamente lo que Francesco De Martini y su grupo, de la Universidad romana de La Sapienza, han logrado en fecha reciente: a partir de láseres, polarizadores y detectores de fotones, han construido una RAM cuántica sencilla y han ensayado nuestro protocolo de búsqueda en una pequeña base de datos. Las búsquedas cuánticas son, pues, una posibilidad real. Si algún día llegaremos a tener RAM cuánticas de mayor capacidad o una Internet cuántica viable, conjeturar lo que ocurrirá después es cosa de cada uno.

Bibliografía complementaria

CRIPTOGRAFIA CUANTICA COMERCIAL. Gary Stix en *Investigación y Ciencia*; marzo, 2005.

QUANTUM RANDOM ACCESS MEMORY. Vittorio Giovannetti, Seth Lloyd y Lorenzo Maccone en *Physical Review Letters*, vol. 100, n.º 16, págs. 160.501-160.504; 25 de abril, 2008.

QUANTUM PRIVATE QUERIES. Vittorio Giovannetti, Seth Lloyd y Lorenzo Maccone en *Physical Review Letters*, vol. 100, n.º 23, págs. 230.502-230.505; 13 de junio, 2008.

THE QUANTUM INTERNET. H. J. Kimble en *Nature*, vol. 453, págs. 1023-1030; 19 junio, 2008.

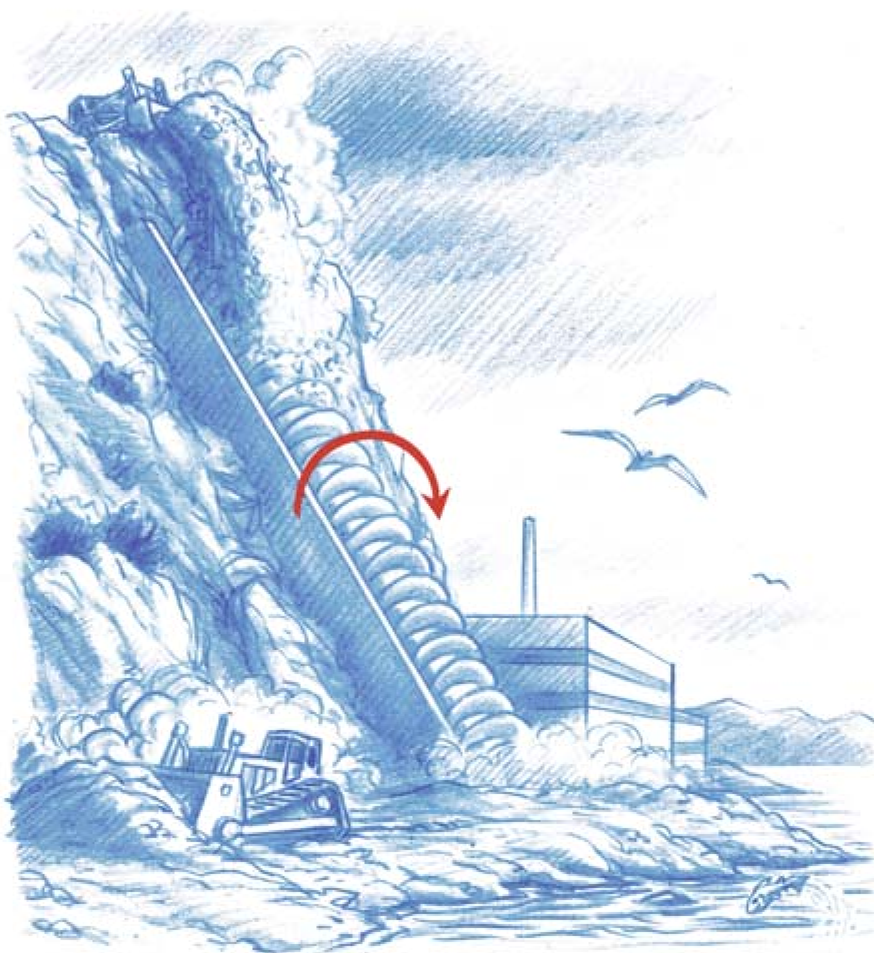
Ya llega la energía litoeléctrica

Si se enrasan las montañas, se allanarían las dificultades energéticas del planeta... al menos allá donde el relieve lo permita y si nos olvidásemos de algunos pequeños inconvenientes materiales

Jean-Michel Courty y Edouard Kierlik

¿De qué estará hecho nuestro porvenir energético? ¿De centrales nucleares? ¿De centrales solares? ¿De centrales hidroeléctricas? ¿De parques eólicos? Sea como fuere, ya es hora de sustituir las energías fósiles por energías renovables. A problemas de fuste, innovación: el científico David Jones propuso hace ya algunos años una revolución energética inspirada en los mecanismos que intervienen en la generación hidroeléctrica. Pero sin agua, ni vino. Según Jones, nuestro futuro reside en la energía potencial gravitatoria de las montañas.

La hidroelectricidad es la transformación directa de la energía potencial gravitatoria de una masa de agua mantenida en alto en energía cinética para accionar una turbina. Basta con dejar caer el agua para recuperar una energía igual al producto de la masa m del agua por la aceleración g de la gravedad y por la altura h de caída (E = mgh). Se calcula fácilmente: un embalse de un kilómetro de ancho, 10 de largo y 100 metros de altura respecto al nivel de las turbinas retiene mil millones de tonelada de agua, a lo que corresponde una energía potencial de 500.000 millones de kilojoule o 140 millones de kilowatt-hora, el consumo anual de 5000 hogares. La hidroelectricidad suministra en Francia 70 terawatt-hora (70 mil millones de terawatt-hora), es decir, aproximadamente el 12 por ciento de las necesidades energéticas; el resto lo suministra sobre todo el sector de la energía nuclear.



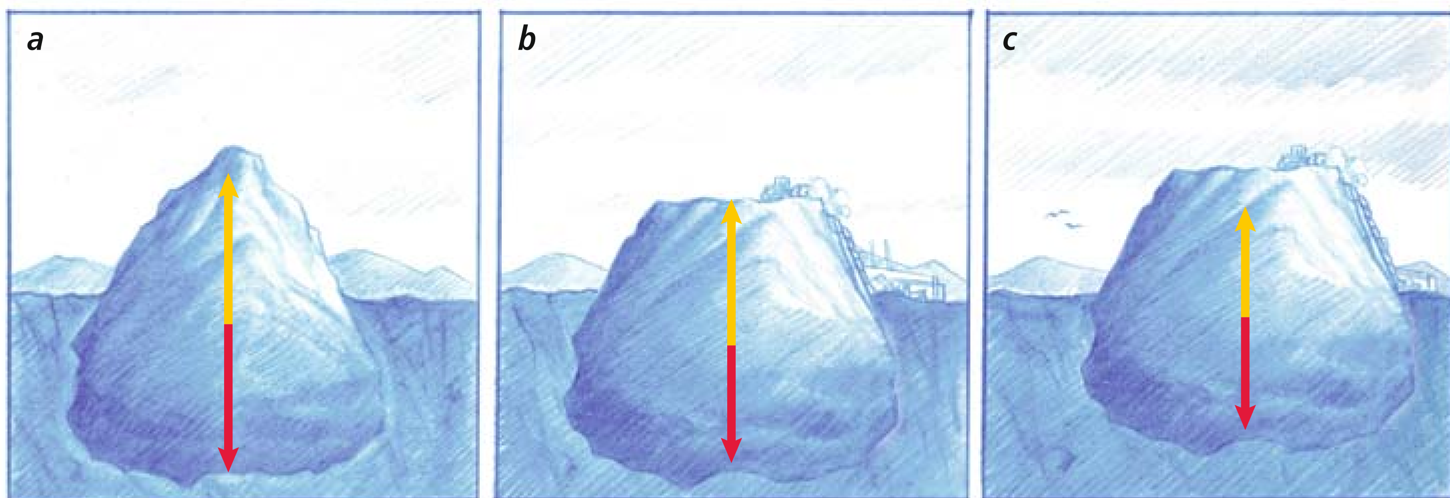
1. Aprovechar la gravedad para obtener energía: en ello se basan las centrales hidroeléctricas, donde la caída del agua acciona las turbinas. ¿Y si cambiamos el agua por tierra? Lanzaríamos la materia desde lo alto de las montañas mediante un tornillo de Arquímedes. La energía de la caída haría rotar el artefacto y produciría electricidad.

ILUSTRACIONES DE BRUNO VACARO

De la hidroelectricidad a la litoelectricidad

A favor de la hidroelectricidad: es una energía renovable, las precipitaciones alimentan los embalses entre el otoño y la primavera. ¿Bastaría para las necesidades que hay? Las precipitaciones medias son, en Francia, de 800 milímetros al año sobre una superficie de 551.602 kilómetros cuadrados, o sea, una masa de agua de $4{,}4 \times 10^{11}$ toneladas. Como la altitud media del territorio francés es de 297 metros, aquella cifra representa una energía potencial anual de $1{,}3 \times 10^{18}$ joules, o sea, $3{,}6 \times 10^{11}$ kilowatt-hora, o 360 terawatt-hora. Esta tosca valoración se acerca, poco más o menos, a la de Electricité de France (EDF), que evalúa en 300 terawatt-hora el potencial hidroeléctrico. Sabiendo que en la práctica sólo puede recuperarse un tercio de esa energía, comprobamos que Francia ya está bien servida hidroeléctricamente; por esa vía, no podrá cubrir todas sus necesidades.

El agua no siempre es líquida. ¿Podríamos aprovechar el inevitable descenso de los glaciares? Estos no están cons-



2. Si arrojáramos al mar la cima de las montañas, ¿nos arriesgaríamos a hacer subir el nivel del agua hasta el punto de sumergirlas? ¡De eso, nada! Compruebe usted mismo que un cubito de hielo que se funde no hace subir el nivel de agua en el vaso. La densidad de las montañas es menor que la del manto terrestre: la montaña flota en el manto y su peso (*rojo*) está equilibrado por el empuje de Arquímedes (*amarillo*) que el manto ejerce sobre su zócalo (*a*). Ese equilibrio, conocido como isostasia, se quiebra provisionalmente en el momento en que la montaña se descabeza (*b*). El zócalo sube y disminuye el volumen de montaña sumergido en el manto, hasta que el empuje de Arquímedes disminuye en la misma cuantía que el peso (*c*).

tituidos sólo por hielo, también arrastran residuos rocosos que evacuan en forma de morrenas. ¿Piedras? ¿Un acarreo bajo los efectos de la gravedad? Como con la carta escondida de Edgar Poe, la solución a nuestros problemas energéticos se nos escapaba cuando en realidad es evidente: ¿y si, en vez de agua, hiciésemos caer la montaña entera?

Calculemos la energía gravitatoria gala. Con una densidad del orden de 2,8, la masa de tierra francesa por encima del nivel del mar es de 5×10^{14} toneladas aproximadamente, más de 1000 veces la masa de las aguas pluviales. Desmochando Francia una media de tres metros y lanzando las rocas al mar, recuperaríamos energía suficiente para alimentar de electricidad al país durante un año.

Renovable gracias a la isostasia

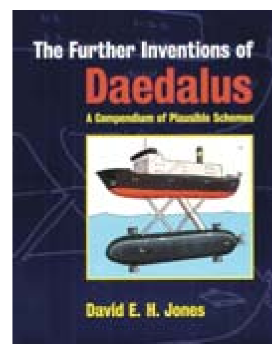
Ya oímos las quejas de los descontentadizos: a ese ritmo, en un siglo Francia se hallaría bajo las aguas. Burdo error. Las montañas no se limitan sólo a lo que vemos. Cada relieve de la superficie consta también de una base que se hunde en el manto terrestre y que asegura el equilibrio hidrostático. El peso de lo que se eleva por encima de la corteza continental está compensado por el empuje de Arquímedes que se ejerce sobre la base, menos pesada (densidad 2,8) que el manto circundante (3,3): la isostasia.

Suponiendo que el bloque continental flote en el manto, se calcula que para sostener el Mont Blanc hace falta una base que se hunde 27 kilómetros en el manto. Si amputáramos al Mont Blanc el 60 por ciento de su masa para dejarlo a la altura de un monte más corriente (se quedaría en 1886 metros), la base soportaría un peso menor y por consiguiente ascendería, restituyendo en parte el relieve: la cima recuperaría los 4000 metros.

Nada se opone, pues, a la puesta en práctica de esta nueva forma de producción de energía que bautizamos con el nombre de litoelectricidad (del griego *lithos*, piedra). Nada, salvo contingencias técnicas. Primero, hay que arrancar las rocas de las montañas: algo, sin duda, posible con todos esos explosivos que llenan los arsenales militares. Luego, ¿cómo moveríamos las piedras? Podemos imaginar sogas a las que se atarían cubos llenos de piedras; el peso de las rocas bastaría para arrancar y mantener después el movimiento (haciendo subir los cubos vacíos) de modo que se produciría un excedente de energía. Mejor iría con un tornillo de Arquímedes, una especie de tornillo sin fin que ya se emplea para elevar agua o transportar cereales. Un tornillo como ese acaba de instalarse en Suiza para generar electricidad a partir, precisamente, de una caída, de agua. Su rendimiento mecánico es excelente: 80 por ciento. El mismo movimiento del líquido hace girar el tornillo; a partir de ese movimiento se genera la electricidad.

Francia debe responder al reto de la litoelectricidad. Montemos experimentos allá donde las montañas se hunden en el mar, como en Córcega o en los Alpes Marítimos, empleando los residuos rocosos para ganar tierra al mar o realzar las zonas amenazadas por la anunciada subida de las aguas. Y que no se nos diga que el procedimiento no es ecológico: sólo acelera la erosión natural de las cimas. Muy al contrario: la energía litoeléctrica se origina en las fuerzas más íntimas de Gea, las de la tectónica de placas. El porvenir está en la nivelación por arriba...

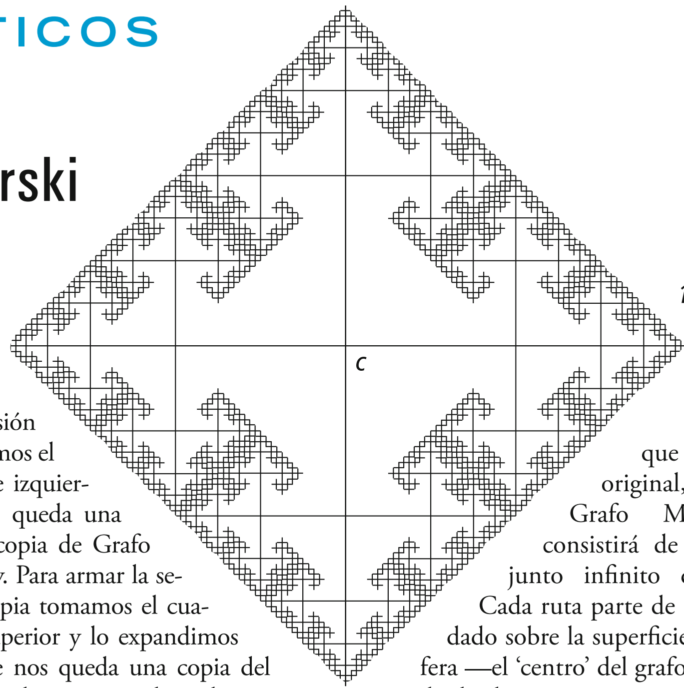
David Jones. *The further inventions of Daedalus*, Oxford University Press.



El teorema de Banach-Tarski

Cómo convertir una bola en dos

Agustín Rayo



Digamos que el objeto que resulta de rellenar una esfera es una *bola*. Por increíble que parezca, es posible dividir una bola en cinco pedazos y reensamblar los pedazos de manera que nos queden dos bolas, cada una del mismo tamaño que la bola original. Al reensamblar los pedazos es necesario modificar su orientación y ubicación. Lo sorprendente es que *no es necesario modificar su forma, o su tamaño*.

En la columna de este mes, veremos cómo es esto posible. (El resultado original es de Stefan Banach y Alfred Tarski, y ha sido refinado por diferentes personas desde su publicación en 1924.)

El Grafo de Cayley

El Grafo de Cayley (*representado en la figura 1*) consta de una colección infinita de 'rutas'. Cada ruta parte del centro, *c*, y es el resultado de seguir una secuencia infinita de pasos. En el primer paso se avanza un metro, en el segundo paso se avanza medio metro, en el tercero se avanza un cuarto de metro, y así sucesivamente. Cada paso se toma en una de cuatro direcciones (arriba, abajo, derecha o izquierda), con la restricción de que está prohibido seguir direcciones opuestas en pasos consecutivos.

A nosotros lo que nos interesa aquí son los vértices del Grafo de Cayley (es decir, el centro *c* y cada uno de los puntos en los que una ruta se divide en tres). Dividamos los vértices, menos *c*, en "cuadrantes", como se ilustra en la figura *2a*. Resulta que los vértices del cuadrante derecho son una versión en miniatura de los vértices del grafo completo, menos los del cuadrante izquierdo. Y lo mismo vale para cada uno de los otros cuadrantes.

Esto nos permite reacomodar los cuadrantes de manera que nos queden dos Grafos de Cayley, si bien será necesario para ello expandir dos de los cuadrantes.

El procedimiento es como sigue (*véase la figura 2b*) Tomemos el cuadrante derecho y expandámoslo de manera que nos quede una copia del grafo completo menos el cuadrante izquierdo. Al resultado de la expansión le agregamos el cuadrante izquierdo y nos queda una primera copia de Grafo de Cayley. Para armar la segunda copia tomamos el cuadrante superior y lo expandimos hasta que nos queda una copia del grafo completo menos el cuadrante inferior, y al resultado de la expansión le añadimos el cuadrante inferior.

(Este proceso ignora el vértice central original *c,* que no corresponde a punto alguno en las dos copias tal y como las genera el proceso, aunque ambas sean reproducciones exactas del grafo original y tengan, por tanto, su propio centro. Hay un truco que nos permite evitar el problema, si no queremos prescindir de c. Puede utilizarse una quinta pieza en la construcción, que conste de *c* y de todos los vértices que resultan de ir en línea recta desde *c* hacia abajo. Esto nos permitiría construir una de las copias del grafo original a partir de: (a) una versión expandida del cuadrante superior, (b) el cuadrante inferior menos los vértices en la quinta pieza, y (c) una versión contraída de la quinta pieza.*)*

El Grafo de Cayley sobre la superficie de una esfera

Para duplicar el Grafo de Cayley fue necesario expandir dos de las piezas. Tales expansiones serían innecesarias en una versión *modificada* del Grafo de Cayley. En la versión original, los pasos que se siguen para construir una ruta son cada vez más cortos: en el primer paso se avanza un metro, en el segundo paso se avanza medio metro, en el tercero se avanza un cuarto de metro, y así sucesivamente. Pero en el Grafo Modificado todos los pasos serían del mismo tamaño.

Es imposible construir el Grafo Modificado de Cayley sobre un plano, porque los vértices del grafo se solaparían unos con otros. Pero es posible construir una versión del Grafo Modificado sobre la superficie de una esfera.

Al igual que el grafo original, nuestro Grafo Modificado consistirá de un conjunto infinito de rutas. Cada ruta parte de un punto dado sobre la superficie de la esfera —el 'centro' del grafo— y es el resultado de seguir una secuencia infinita de pasos. Los pasos consisten en rotar la esfera una cierta distancia θ (escogida con cuidado). Los pasos hacia la 'derecha' o 'izquierda' son rotaciones de θ o –θ grados sobre el eje norte-sur. Los pasos hacia 'arriba' o 'abajo' son rotaciones de θ o –θ grados sobre algún eje ortogonal al eje norte-sur. (En "www.investigacionyciencia.es/archivos/Cayley.pdf" se muestran los primeros pasos.)

El mismo procedimiento con que duplicamos el Grafo de Cayley original vale para duplicar el Grafo Modificado de Cayley, pero en este caso *no es necesario alterar el tamaño de las piezas*. Al igual que el grafo original, el Grafo Modificado puede dividirse en cuadrantes. Pero ahora sucede algo muy sorprendente. El cuadrante 'derecho' tiene *exactamente la misma forma y tamaño* que el grafo completo menos el cuadrante 'izquierdo'. La única diferencia entre ellos es que están ubicados en lugares diferentes de la superficie de la esfera. Si rotáramos al cuadrante 'derecho' –θ grados sobre el eje norte-sur de la esfera, coincidiría exactamente con el grafo completo menos el cuadrante 'izquierdo'. Lo mismo es cierto de cada uno de los otros cuadrantes.

Podemos, pues, duplicar el Grafo Modificado utilizando el procedimiento siguiente. Primero dividimos el grafo en cuadrantes. Después, tomamos el cuadrante 'derecho', lo rotamos –θ grados sobre el eje norte-sur de la esfera y lo juntamos con el cuadrante 'izquierdo'. Esto nos da una primera copia de grafo completo. Finalmente, tomamos el cuadrante 'superior', lo rotamos –θ grados sobre un cierto eje ortogonal al eje norte-sur de la esfera y lo juntamos con el cuadrante 'in-

ferior'. Esto nos da la segunda copia del grafo completo.

Cómo duplicar la bola

El primer paso es dividir la superficie de nuestra bola en *órbitas*. Diremos que dos puntos están en la misma órbita si y sólo si se puede llegar del uno al otro utilizando un número finito de rotaciones como las descritas en la sección anterior.

Cada órbita es, en realidad, un Grafo Modificado de Cayley; lo único que tenemos que hacer es decidir qué punto en la órbita va a contar como el 'centro' del grafo. Por tanto, si escogemos un centro para de cada órbita, habremos divido la superficie de la bola en un número infinito de Grafos Modificados de Cayley.

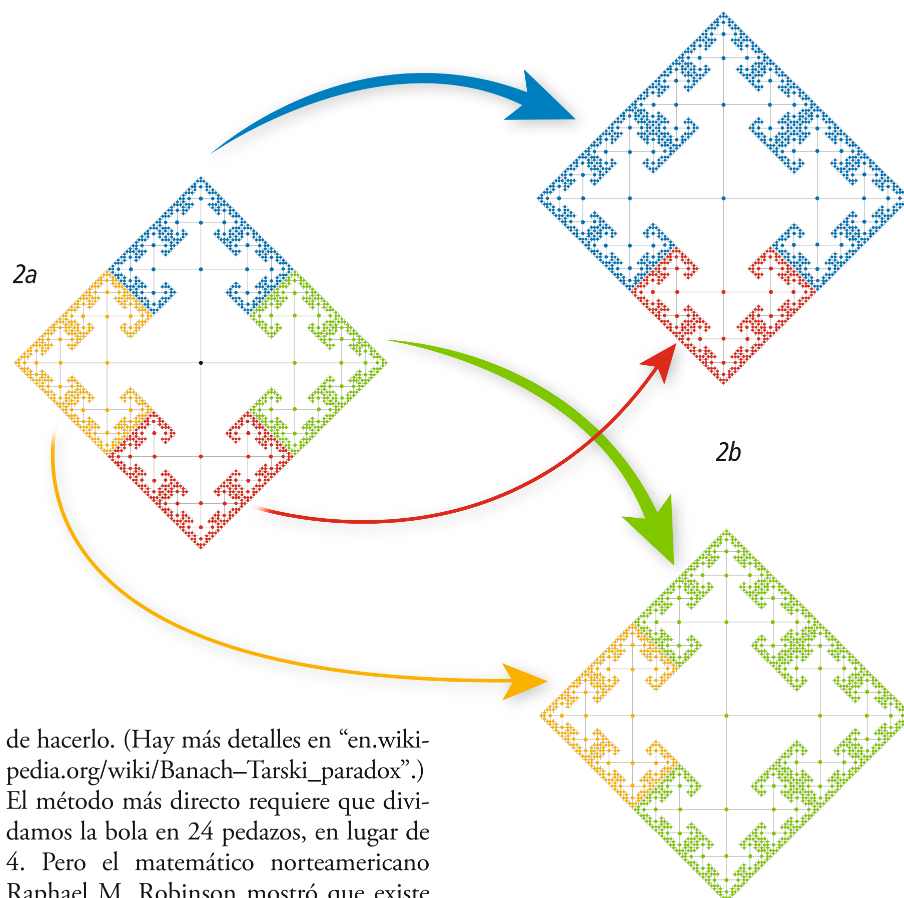
Cada uno de estos Grafo Modificados puede dividirse en cuadrantes, tal y como hicimos en la sección anterior. Esto significa que también a la superficie de la bola la podemos dividir en 'cuadrantes'. Diremos, por ejemplo, que el 'cuadrante superior' de la bola es la unión de los cuadrantes superiores de todos los Grafos Modificados que cubren a la bola. Y así sucesivamente.

Esto nos da un procedimiento para duplicar la superficie de la bola. Primero la dividimos en cuadrantes. Después, tomamos el cuadrante 'derecho', lo rotamos –θ grados sobre el eje norte-sur y lo juntamos con el cuadrante 'izquierdo'. Esto no da una primera copia de la superficie completa. Finalmente, tomamos el cuadrante 'superior', lo rotamos –θ grados sobre un cierto eje ortogonal al eje norte-sur, y lo juntamos con el cuadrante 'inferior'. Esto nos da la segunda copia del grafo completo.

Una vez que sabemos cómo duplicar la *superficie* de la bola, es fácil duplicar la bola entera. Se usa el mismo procedimiento, pero en lugar de considerar un punto dado sobre la superficie de la bola, consideramos la línea que va de ese punto al centro de la bola.

Puntos escurridizos

He omitido un detalle importante. El procedimiento anterior funciona para *casi* todos los puntos en la superficie de la bola, pero no para todos. (No funciona en el caso de órbitas que incluyen los puntos que están sobre los ejes de rotación, y no funciona para el centro de la bola.) Para lidiar con estos puntos escurridizos hay que complicar la prueba, pero Banach y Tarski encontraron la manera de hacerlo. (Hay más detalles en "en.wikipedia.org/wiki/Banach–Tarski_paradox".) El método más directo requiere que dividamos la bola en 24 pedazos, en lugar de 4. Pero el matemático norteamericano Raphael M. Robinson mostró que existe un procedimiento más complejo que requiere de sólo 5 pedazos. (Robinson probó también que es imposible utilizar menos de 5 pedazos.)



¿Paradoja?

Cuando duplicamos una bola, algo raro ha sucedido. Supongamos, por ejemplo, que la bola original tiene un volumen de un metro cúbico. Entonces las bolas que resultan del proceso de duplicación tienen un volumen combinado de dos metros cúbicos. ¿De dónde salió el volumen adicional?

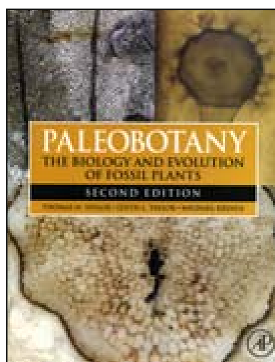
Es tentador pensar que el volumen de un objeto depende sólo del número de puntos que ocupa. Pero eso no puede estar bien. Es posible demostrar que cualquier bola de cualquier tamaño tiene exactamente el mismo número de puntos que cualquier bola de cualquier otro tamaño. (Hablo más sobre estos temas en "El infinito", Investigación y Ciencia, diciembre de 2008.)

El volumen de un objeto depende no sólo del número de puntos en el espacio que ocupa sino también de las *relaciones geométricas* entre puntos. La razón por la que el teorema de Banach-Tarski es tan sorprendente es que la bola se divide en un número finito de piezas, y dentro de cada pieza no hay ningún cambio en las relaciones geométricas entre puntos. De esto se sigue que el volumen de cada pieza tiene que mantenerse constante durante el proceso. Pero si el volumen de la bola original es la suma de los volúmenes de las piezas, y si el volumen combinado de las bolas resultantes es la suma de los volúmenes de las piezas, ¿cuál es el volumen combinado de las piezas? ¿Es un metro cúbico o dos?

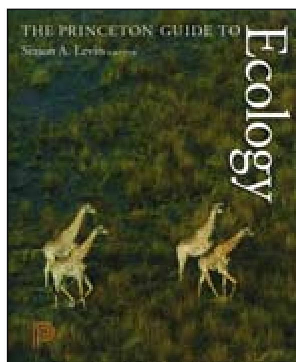
La respuesta es que el volumen de las piezas *no está bien definido*. Tenemos un método canónico para medir volúmenes, desarrollado por el gran matemático francés Henri Lebesgue, y es posible probar que no todas las piezas que figuran en la desarticulación de la bola pueden tener medida de Lebesgue.

Para probar que hay conjuntos no-medibles —y, en particular, para probar que existen las piezas que se necesitan para duplicar la bola— es necesario asumir el Axioma de Elección. (Aquí lo utilizamos cuando asumimos que es posible escoger un centro para cada órbita.) El sabor paradójico de los conjuntos no-medibles ha llevado a algunos matemáticos a cuestionar el Axioma de Elección. (Hablo más sobre conjuntos no-medibles en "Sombreros e infinitos", Investigación y Ciencia, abril de 2009.)

Agustín Rayo es profesor de filosofía en el Instituto de Tecnología de Massachusetts.



PALEOBOTANY. THE BIOLOGY AND EVOLUTION OF FOSSIL PLANTS,
por Thomas N. Taylor, Edith L. Taylor y Michael Krings. Academic Press; Burlington, MA; 2009.



THE PRINCETON GUIDE TO ECOLOGY.
Dirigido por Aimon A. Levin. Princeton University Press; Princeton, 2009.

Cierre del año Darwin

Paleobiología como fundamento de la teoría de la evolución y ecología como expresión de la misma

El cierre del año Darwin nos invita a reflexionar sobre dos aspectos de la biología que ponen de manifiesto con particular nitidez el fenómeno evolutivo: el registro paleontológico (*Paleobotany*) y la diversificación de la vida (*The Princeton Guide to Ecology*).

Caracteriza a la paleobotánica su naturaleza interdisciplinar, con la predominante convergencia de biólogos y geólogos. Las plantas fósiles constituyen también registros fiables del cambio climático; de un período geológico a otro, presentan diferencias en tamaño y forma, nivel de complejidad y abundancia. Cambios que reflejan la evolución en el transcurso del tiempo. En el registro descubrimos el momento aproximado en que se originaron los grandes grupos, la época en que adquirieron su máxima diversidad y, según el caso, cuándo se extinguieron.

Debido al estado fragmentario de los restos conservados, el paleobotánico debe empezar su tarea por reconstruir la planta entera. Luego, podrá determinar el grupo con el que el fósil guarda mayor parentesco y pasar, acto seguido, a su forma de reproducción y método de diseminación. La madera fósil recuperada del Pérmico y del Triásico de la Antártida nos revela, a partir de los anillos, que el clima era muy favorable para el desarrollo de los árboles; ahora bien, esa observación debe completarse con la que resulta de los modelos de circulación general del paleoclima pérmico, que indican que tales paleolatitudes eran muy frías. Compete al paleobotánico deshacer esa aparente paradoja. De muchos fósiles vegetales podemos deducir la relación entre forma y función, inferir las ventajas o limitaciones impuestas por el desarrollo, basándonos en sus propiedades biomecánicas. A menudo se recurre para ello a simulaciones por ordenador. El tamaño y figura de la planta pueden ya examinarse en un amplio espectro de morfologías vegetales. La hoja ocupa en estas investigaciones un lugar central.

Cuestiones nucleares son las relativas al origen y evolución subsiguiente de los grandes grupos, con sus interrelaciones. ¿Cuándo aparecieron las plantas? ¿Qué aspecto mostraban? ¿Cuándo surgieron los primeros representantes de los grupos principales? ¿Por qué determinados tipos desarrollaron la capacidad de producir tejidos secundarios (la madera), mientras que otras permanecieron en su condición herbácea? ¿Hubo simbiosis y mutualismo vegetal en el pasado? ¿En qué medida puede el registro fósil vegetal informarnos de la interacción, hace millones de años, entre las plantas y animales? ¿Podemos determinar a partir del registro si las plantas habían adquiridos rasgos que servían para atraer a los polinizadores? ¿Sintetizaban sustancias químicas que disuadían del herbivorismo? Para todas esas cuestiones tiene respuesta la ciencia.

En bioestratigrafía, los granos de polen y las esporas se han utilizado como índices de datación y sucesión. Por su parte, los megafósiles (hojas) han permitido acotar rocas de antiguos lagos y sistemas fluviales cuya correlación litológica resulta muy difícil.

La disciplina cuenta con varios recursos en su tarea investigadora. El método del pariente más próximo, de éxito rubricado en el desciframiento de las floras del Mesozoico y el Cenozoico, compara fósiles con especímenes actuales de una misma flora. El análisis de la fisiognomía de la hoja, estrechamente asociado al clima, se aplica a las angiospermas. El *índice de los estomas* es inversamente proporcional a los niveles atmosféricos de CO_2. Para describir una hoja fósil, el paleontólogo se detiene en su tamaño, distribución de los dientes en el limbo foliar, base y ápice, longitud y forma del peciolo; examina la pauta de la venación y los tricomas, sin olvidar el análisis de la ultraestructura de la cutícula. Podemos determinar la proporción de isótopos del carbono (^{13}C frente a ^{12}C) y utilizarlo para reconstruir el paleoambiente o el tipo de fotosíntesis empleado por la planta (fotosíntesis C_3 frente a fotosíntesis C_4). Desde hace unos veinte años, se han venido aplicando secuencias moleculares, del ADN del núcleo, de los cloroplastos y de las mitocondrias para establecer relaciones de parentesco y filogenéticas.

Algunas plantas y otros organismos nunca dejarán fósiles. La materia vegetal muerta es degradada por hongos y bacterias aeróbicos. Por eso el proceso de fosilización demanda que las plantas muertas se depositen en un entorno anaeróbico. Una vez depositadas, los sedimentos deben cubrirlas. Las canteras, las trincheras, las minas y las obras públicas descubren a menudo cortes donde afloran restos fósiles.

Cuando las condiciones de enterramiento son rápidas y especialmente en medios muy secos o fríos, las partes leñosas sobreviven millones de años sin apenas alteración. Los restos momificados de depósitos del Cenozoico representan un tipo especial de conservación en el que el tejido de la planta quedó rápidamente deshidratado y enterrado. Tan bien conservados se mantienen células y

tejidos de tales especímenes, que pueden estudiarse mediante las mismas técnicas que aplicamos en la investigación de las plantas vivas. Otro ejemplo de material inalterado es el ámbar. Debido a su consistencia pegajosa ha servido de matriz fosilizadora de granos de polen, flores pequeñas, hongos, insectos y otros.

A la postre, lo que al biólogo importa es el origen, evolución y diversidad vegetal. Los sistemas de clasificación se basan en los caracteres compartidos, que nos permiten reconocer géneros, familias y otros taxones superiores. Los caracteres en cuestión se agrupan en dos categorías. En un grupo se inscriben los rasgos primitivos (plesiomorfías), que aparecieron evolutivamente en una época temprana; por ejemplo, el tejido vascular en plantas terrestres. El otro grupo de caracteres se supone que evolucionaron en fecha más reciente. Estos rasgos avanzados o especializados (apomorfías) pueden emplearse para identificar organismos que comparten un mismo antepasado precursor. La cladística, o sistema filogenético de clasificación, tiene por objetivo producir una organización jerárquica de los taxones basados en rasgos derivados compartidos (sinapomorfías), que reflejen la evolución de grupos particulares.

Si la paleontología aportó pruebas sólidas para convencerse de la realidad de la evolución, los escritos de Charles Darwin y Alfred Russel Wallace crearon el ambiente propicio para abordar las interrelaciones de las especies entre sí y con su entorno (*The Princeton Guide to Ecology*). El término *oekologie*, que combina las ideas de mantenimiento de la casa y conocimiento, fue acuñado en 1866 por Ernst Haeckel; el concepto mereció pronto la atención de Johannes Eugenius Buelow Warming en *Comunidades vegetales. Introducción a la geografía ecológica de las plantas*. A lo largo del siglo XX la ciencia ecológica se fue enriqueciendo merced a los puentes tendidos con la matemática, la física, la ingeniería y la biología molecular. Ciencia unificadora e integradora del conocimiento de la vida sobre el planeta, considera los sistemas biológicos como un todo, no como partes independientes. Esa perspectiva holista recibe ahora la denominación de teoría de los sistemas complejos adaptativos. Acostumbra distinguirse entre autoecología, que describe la interacción de una especie con su entorno, y sinecología, que se ocupa de la interacción entre múltiples especies. La sinecología superpone su ámbito al de la ecología de comunidades.

Clave en cualquier análisis de la autoecología es el concepto de nicho, cuyo sentido más general es el de la manera en que los miembros de una población dada se desenvuelven en un determinado medio, biótico y abiótico; abarca, pues, el lugar donde medran los organismos y la función que allí desempeñan. El entorno plantea numerosos retos a los organismos. Inherente a la explicación de los mecanismos de interacción entre especie y entorno es el concepto de adaptación, la idea de que la selección natural ha moldeado las características de las poblaciones de suerte tal, que se encuentran bien encajadas en las circunstancias particulares del medio. Los animales y en cierto sentido las plantas de crecimiento rápido pueden condicionar la forma de su interacción con el entorno por medio de la conducta. Los animales pueden escoger el hábitat donde se desenvuelven; muchos organismos se marchan del lugar de nacimiento cuando alcanzan cierta fase de su vida, aunque para las plantas y algunos animales la dispersión es un fenómeno pasivo. Pero las plantas disponen a menudo de otra opción: exhiben plasticidad fenotípica para alterar su fenotipo de una forma ventajosa y así mejorar su adaptación. Otra forma de adaptación consiste en modificar el ciclo biológico para acomodarlo al entorno.

El foco en ecología de ecosistemas ha recaído tradicionalmente en el funcionamiento global del ecosistema, concepto que abarca una gavilla de procesos biológicos, físicos y químicos que ponen en conexión organismos y ambiente. ¿De qué modo la energía es captada, transferida y por fin disipada en entidades diversas? ¿Cómo se reciclan los nutrientes limitantes, asegurándose la renovación de elementos materiales necesarios para el desarrollo? ¿Qué factores y procesos controlan los flujos de energía y de materia, desde la escala local hasta la global? Al abordar la dinámica de poblaciones se emplea el parámetro maltusiano, la tasa de crecimiento geométrico de la población dando por supuesto que permanecen inalterados los parámetros demográficos. La medición de las especies desde una escala local hasta una escala global es mucho más difícil de lo que pudiera parecer a primera vista. La competencia se ha venido considerando como el factor principal que gobierna la coexistencia entre especies y, por tanto, la diversidad de especies y otros parámetros. Otra interacción es la depredación, que repercute en la persistencia de las especies y en su diversidad. Interacciones positivas entre especies son el mutualismo y la facilitación.

Se dice que la ecología contemporánea ha avanzado de la cadena trófica a la cascada trófica: la depredación por carnívoros tiende a suprimir la población de herbívoros, lo que conlleva la liberación de las plantas del control de los herbívoros. Esa cascada de efectos como resultado del control "de arriba abajo" de la cadena alimentaria puede repercutir intensamente en la biomasa de los distintos estratos tróficos y en el funcionamiento de los ecosistemas. Cuando un número alto de especies se depredan entre sí, no siempre se escalonan en niveles tróficos, sino que constituyen una *red trófica*.

En fecha reciente ha entrado en ecología el concepto de unidad paisajística. Un paisaje terrestre puede considerarse un sistema de elementos biológicos (organismos, poblaciones, comunidades) que forman un patrón en una unidad geomórfica. La dinámica de esos ecosistemas viene impulsada por la topografía, el clima y la interacción entre procesos geoquímicos y biofísicos. Los paisajes constituyen sistemas adaptativos complejos y autoorganizados.

Por fin, en muchos aspectos, la degradación de los ecosistemas y el temor a la extinción de especies pesan en el moderno concepto de conservación. La novedad que aporta la biología de la conservación estriba en la síntesis que realiza de otras disciplinas, incluidas la biología evolutiva, la ecología, la economía y la sociología. La *extinción de las especies* constituye una de las manifestaciones más visibles e irreversibles de la pérdida de biodiversidad. Son múltiples las formas en que la acción del hombre acelera esa extinción. La pérdida de unas (polinizadores) conlleva la pérdida de otras (plantas polinizadas). Las cinco grandes extinciones en masa, con pérdidas de entre el 55 y el 95 por ciento de las especies, ocurrieron en el Ordovícico (hace 490-443 millones de años); Devónico (417-354 millones de años), Pérmico (299-250 millones de años), Triásico (251-200 millones de años) y Cretácico (146-64 millones de años). La acción del hombre en las dos últimas centurias ha precipitado una crisis global o la onda de la sexta gran extinción, equiparable a las cinco anteriores.

Luis Alonso

INDICE ANUAL

Este índice contiene los títulos de los artículos y los nombres de los autores aparecidos en Investigación y Ciencia *a partir de enero de 2009*

TITULOS

Agujeros negros supermasivos; septiembre, pág. 30.
Alimentación y efecto invernadero; abril, pág. 76.
Almidón, El; septiembre, pág. 41.
Anillos de Liesegang, Los; febrero, pág. 86.
Año del gorila, El; julio, pág. 38.
Apagones y quiebras en cadena; marzo, pág. 44.
Ascensores. Suben nuevos diseños; abril, pág. 92.
Avances en ingeniería tisular; julio, pág. 82.
Aventuras en el espaciotiempo curvo; octubre, página 22.
Babosas marinas invasoras; mayo, pág. 9.
Bacterias marinas y cambio climático; junio, página 40.
Biocarburantes celulósicos; septiembre, pág. 44.
Buenas noticias sobre el control de la malaria; octubre, pág. 89.
Búsqueda de más Tierras, La; agosto, pág. 21.
Café turco centrifugado; agosto, pág. 90.
Calorías y cáncer; abril, pág. 10.
Camille Parmesan: huida de los campos de la muerte; mayo, pág. 38.
Cánulas vasculares. Stents; octubre, pág. 92.
Cartas, monedas y sombreros; febrero, pág. 90.
Causas de la enfermedad celíaca; octubre, pág. 40.
Cava, El; junio, pág. 39.
Cicloides y el conjunto de Mandelbrot, Las; noviembre, pág. 88.
Ciencia de las burbujas y los colapsos, La; septiembre, pág. 80.
Ciencia, filosofía y teología en el proceso a Galileo; julio, pág. 60.
Ciudades perdidas del Amazonas, Las; diciembre, página 40.
Claves de la superconductividad a altas temperaturas; octubre, pág. 78.
Cohetes eléctricos; abril, pág. 32.
Cómo salvar el mundo con una lámpara de sobremesa; mayo, pág. 90.
Computadoras de ADN para el trabajo y el juego; febrero, pág. 78.
Concienciación polìtica y social en EE.UU.; marzo, pág. 7.
Conservación del patrimonio histórico; febrero, página 7.
Contaminación genética en la perdiz roja; agosto, página 8.
Convección de Bénard; octubre, pág. 86.
Crisis alimentarias: ¿una amenaza para la civilización?; julio, pág. 74.
Crisis de la gestión pública en Estados Unidos, La; diciembre, pág. 38.
Crisis del fósforo, La; agosto, pág. 22.
Cromosomas parásitos; julio, pág. 40.
¿Cuán difícil es el problema lógico más difícil de la historia?; marzo, pág. 90.
Cuatro falacias de la psicología evolutiva popular; enero, pág. 58.
Chocolate, El; marzo, pág. 45.
De la Luna a Marte; septiembre, pág. 14.
Defensa imposible; octubre, pág. 38.
Del átomo al carácter; enero, pág. 26.
Desequilibrio en el ecosistema intestinal; octubre, página 48.
Desnudos con los rayos T; septiembre, pág. 90.
Detección del tránsito de HD 80606b; noviembre, pág. 14.
Domesticación del gato, La; agosto, pág. 50.
Dos mundos, una física; octubre, pág. 49.
Educación secundaria en España, La; agosto, pág. 82.
Efecto Casimir, El; marzo, pág. 54.
Encélado; marzo, pág. 14.
Energía litoeléctrica, Ya llega la; diciembre, pág. 88.
Energía oscura o vacío cósmico; junio, pág. 14.
Energía y medioambiente; diciembre, pág. 10.
Energías de fuentes renovables; mayo, pág. 56.
Enfriamiento de estrellas de neutrones; junio, página 12.
Escudos contra la radiación solar; febrero, pág. 18.
Eslabón débil, El; diciembre, pág. 6.
Espionaje informático por canales indirectos; julio, página 68.
Espuma de montaña; mayo, pág. 36.
Estratagemas del creacionismo; enero, pág. 74.
Estrellas negras; diciembre, pág. 12.
Evolución "por el bien del grupo"; enero, pág. 46.
Evolución de la visión de los colores en los primates; junio, pág. 42.
Evolución en la vida cotidiana, La; enero, pág. 66.
Evolución en movimiento; enero, pág. 8.
Evolución en una botella; julio, pág. 12.
Evolución virtual; enero, pág. 88.
Explotación de las reservas de petróleo; diciembre, página 28.
Extinción de los neandertales, La; octubre, pág. 16.
Farmacoterapias contra el VIH; febrero, pág. 51.
Fermi, Pasta, Ulam y el nacimiento de la matemática experimental; agosto, pág. 72.
Fósiles virtuales en cenizas del Silúrico; febrero, página 69.
Francisco J. Ayala: La evolución del cristiano; enero, pág. 36.
Genética de la selección natural; enero, pág. 18.
Genética de los neandertales; mayo, pág. 11.
Genoma del mamut, El; abril, pág. 8.
George Sugihara: el caos y la pesca del día; abril, página 42.
Historia de una invasión; diciembre, pág. 36.
Historias particulares; noviembre, pág. 36.
Homo sapiens del futuro, El; enero, pág. 82.
Horno de microondas. Cena y espectáculo; marzo, página 92.
Identificación de galaxias remotas; febrero, pág. 58.
Iluminación cuántica; octubre, pág. 14.
Indicadores biológicos y transformación del territorio; abril, pág. 12.
Inferencias imposibles; agosto, pág. 13.
Iniciación reiterativa de la replicación del ADN; febrero, pág. 9.
Inicios de la radiactividad en España, Los; julio, página 9.
Interfaz entre el cerebro y la máquina; febrero, página 12.
Investigación del Sol en la época de Galileo, La; diciembre, pág. 66.
Invisible factoría de carbono en los océanos, La; abril, pág. 14.
Jamón curado, El; diciembre, pág. 39.
John Pawelek: Teoría de una fusión letal; marzo, pág. 42.
Largo brazo de la segunda ley, El; febrero, pág. 28.
Láseres ultralargos; agosto, pág. 58.
Láseres verdes en miniatura; junio, pág. 58.
Lateralización del cerebro; septiembre, pág. 62.
Legado de Darwin, El; enero, pág. 12.
Ligeros como la luz; febrero, pág. 36.
Límites del crecimiento tras el cenit del petróleo, Los; octubre, pág. 69.
Linaje humano, El; enero, pág. 38.
Líquidos y hielos de espín; abril, pág. 53.
Longevidad del transistor; mayo, pág. 41.
Magia y cerebro; marzo, pág. 32.
Marcha atrás del reloj celular; febrero, pág. 34.
Marismas costeras; julio, pág. 10.
Más duro que el diamante; diciembre, pág. 74.
Materia obscura en el sistema solar; febrero, pág. 6.
Mecánica de la migración celular; noviembre, página 16.
Megaterremoto en el Valle de Cachemira; abril, página 80.
Memorias racetrack; agosto, pág. 66.
Micronadadores coloidales; julio, pág. 35.
Morfología del cerebro; abril, pág. 62.
Movimiento de las proteínas, El; abril, pág. 68.
Mundo cóncavo, El; junio, pág. 86.
Mutaciones silenciosas; agosto, pág. 28.
Nanoantenas ópticas; agosto, pág. 10.
Nanohilos semiconductores; septiembre, pág. 8.
Nanomedicina contra el cáncer; abril, pág. 24.
Nanomotores térmicos; diciembre, pág. 7.
Nanorradios; mayo, pág. 22.
Nanotecnia medieval; noviembre, pág. 10.
Necesidad de políticas estables, La; mayo, página 40.
Nubosidad e irradiancia eritemática; noviembre, página 11.
Nueva biomolécula, Una; marzo, pág. 24.
Nueva gripe humana de origen porcino; junio, página 10.
Nueva visita al problema de los tres dioses; enero, página 90.
Nuevas tácticas contra bacterias resistentes; septiembre, pág. 22.
Nuevas tácticas contra la tuberculosis; mayo, página 78.
Nuevos fármacos contra el sida; febrero, pág. 55.
Observatorio Pierre Auger; junio, pág. 8.
Origen de la vida, El; septiembre, pág. 70.
Origen de la computación, El; noviembre, página 80.
Origen de la cultura humana, El; noviembre, página 62.
Origen de la mente, El; noviembre, pág. 54.
Origen de la vida, El; noviembre, pág. 38.
Origen de las células, El; noviembre, pág. 48.
Origen del fondo submarino; mayo, pág. 50.
Origen del Neolítico, El; noviembre, pág. 72.
Origen del universo, El; noviembre, pág. 18.
Origen galileano de la cosmología moderna, El; noviembre, pág. 26.
Origen y evolución de los murciélagos; marzo, página 64.

Orígenes del telescopio, Los; septiembre, pág. 52.
Ornamentación arquitectónica toraja; septiembre, página 11.
Otra solución: distorsionar el perfil de usuario; diciembre, pág. 86.
Oxidos eutécticos, Los; abril, pág. 11.
Pagar para que el gobierno haga lo que debe hacer; julio, pág. 37.
Paleocolapsos submarinos en Mallorca; diciembre, página 4.
Parásito amigable, Un; enero, pág. 34.
Pasado, presente y futuro de las vacunas; diciembre, pág. 58.
Pérdidas en las atmósferas planetarias; julio, pág. 14.
Persiguiendo el arco iris; marzo, pág. 13.
Pingüino de Magallanes; marzo, pág. 40.
Planetas ectópicos; agosto, pág. 14.
Plantas ruderales; marzo, pág. 10.
Pnicturos de hierro; octubre, pág. 10.
Poliformismo y sobredominancia en el genoma humano; mayo, pág. 8.
Potenciadores de la cognición; diciembre, pág. 20.
Prevención de pandemias; junio, pág. 64.
Principio de localidad, El; mayo, pág. 14.
Prioridades para solucionar la crisis financiera; febrero, pág. 89.
Priorizar las políticas del carbono; noviembre, página 91.
Prisioneros y María, Los; agosto, pág. 92.
Privacidad e Internet cuántica; diciembre, pág. 82.
Problema de la coincidencia cósmica, El; diciembre, pág. 8.
Problema imposible?, ¿Un; julio, pág. 92.
Progreso se acelera, El; enero, pág. 92.
Propagación de la gripe A; noviembre, pág. 12.
Propulsión a chorro. Un poquito más; junio, pág. 92.
Propulsión y conducción de nanorrobots; julio, página 30.
Puertas nanoscópicas supramoleculares; marzo, página 11.
¿Qué es la ontología génica?; marzo, pág. 73.
¿Qué nos hace humanos?; julio, pág. 24.
¿Qué son los números?; junio, pág. 90.
Quark top solitario, El; julio, pág. 8.
Quimioquinas y senescencia celular; mayo, pág. 12.
Racionalidad e infinito; noviembre, pág. 92.
Rareza de las especies, La; mayo, pág. 62.
Rasgos anatómicos del pasado; enero, pág. 42.
Rayos en casa; julio, pág. 90.
Realidad de los cuantos, La; junio, pág. 30.
Rebote o rotura; marzo, pág. 88.
Recibido y oído; abril, pág. 90.
Refinerías de petróleo. Destilados del carbono; agosto, pág. 38.
Regulación génica del comportamiento social de las abejas, La; agosto, pág. 40.
Repensar la oferta monetaria mundial; agosto, página 37.
Reproducción sexual en el olivo; abril, pág. 40.
Residuos nucleares: ¿nuevas soluciones?; octubre, página 30.
Resistencia a la deforestación; marzo, pág. 12.
Revolución de Galileo y la transformación de la ciencia, La; julio, pág. 50.
Ribosoma y la traducción genética, El; diciembre, página 48.
RMN portátil; marzo, pág. 82.
Robots que caminan; febrero, pág. 8.
Salvar la abeja melífera; junio, pág. 22.
Salvar las neuronas nuevas; mayo, pág. 28.
Seguridad dinámica para automóviles; marzo, página 46.
Ser mujer en El Argar; abril, pág. 9.
Sigue la busca de una vacuna; febrero, pág. 43.
Sigue siendo necesario un plan sobre el clima; septiembre, pág. 89.
Silenciosa pandemia de las abejas, La; octubre, página 8.
Síndrome de Zellweger, El; marzo, pág. 8.
Singularidades desnudas; abril, pág. 16.
Sino de Ugarit, El; agosto, pág. 44.
Sistema de posicionamiento global. ¿Cuál es mi lugar en el mundo?; febrero, pág. 92.
Sombreros e infinitos; abril, pág. 88.
Técnicas de copiado y reproducción; mayo, pág. 87.
Tejados verdes, Los; septiembre, pág. 9.
Teléfonos inteligentes; mayo, pág. 92.
Teorema de Banach-Tarski, El; diciembre, pág. 90.
Teoría de cuerdas y el LHC, La; octubre, pág. 60.
Terapia combinada para la tuberculosis latente; mayo, pág. 83.
Trampa del estrés postraumático, La; junio, pág. 79.
Transformación de la industria automovilística, La; abril, pág. 44.
Tres problemas sobre uso y mención; septiembre, página 92.
Trilobites del Ordovícico ibérico; agosto, pág. 11.
Turiasaurus riodevensis: el gigante europeo; junio, página 50.
Vacas, cerdos, pollos y excrementos; enero, pág. 9.
Velar por el futuro; enero, pág. 11.
Viajes a través del tiempo; octubre, pág. 90.
Vida en el límite: acidófilos; septiembre, pág. 42.
Vigilancia de ensayos nucleares; mayo, pág. 70.
VIH, 25 años después, El; febrero, pág. 42.
Vito Volterra; junio, pág. 70.

AUTORES

Acosta, Juan Carlos; mayo, pág. 12.
Albert, David Z; mayo, pág. 14.
Albertí Palmer, Miquel; septiembre, pág. 11.
Alcalá, Luis; junio, pág. 50.
Alché, Juan de Dios; abril, pág. 40.
Alonso, Santos; mayo, pág. 8.
Amils, Ricardo; septiembre, pág. 42.
Angel-Ripoll, Laia; junio, pág. 40.
Ania Castañón, Juan Diego; agosto, pág. 58.
Antequera, Francisco; febrero, pág. 9.
Appell, David; mayo, pág. 38.
Arana, Pilar; agosto, pág. 8.
Arbiol, Jordi; septiembre, pág. 8.
Ashley, Steven; marzo, pág. 46.
Atienza, Dacha; diciembre, pág. 36.
Bachtold, Adrian; diciembre, pág. 7.
Ballou, Rafik; abril, pág. 53.
Barbas, Helen; abril, pág. 62.
Barceló, Carlos; diciembre, pág. 12.
Barreiro, Amelia; diciembre, pág. 7.
Barry, Clifton E.; mayo, pág. 78.
Bhat, Ismail; abril, pág. 80.
Bilham, Roger; abril, pág. 80.
Blümich, Bernhard; marzo, pág. 82.
Boada Ferrer, Marc; febrero, pág. 86, mayo, pág. 87 y octubre, pág. 86.
Branch, Glenn; enero, pág. 74.
Bredekamp, Horst; diciembre, pág. 66.
Bretschneider, Joachim; agosto, pág. 44.
Briggs, Derek E. G.; febrero, pág. 69.
Brown, Lester R.; julio, pág. 74.
Buller, David J.; enero, pág. 58.
Büttner, Jochen; octubre, pág. 49.
Cabrero, Josefa; julio, pág. 40.
Camacho, Juan Pedro M.; julio, 40.
Campbell, David K.; agosto, pág. 72.
Campbell-Kelly, M.; noviembre, pág. 80.
Carboneras, Carles; noviembre, pág. 36.
Cardona, Pere-Joan; mayo, pág. 83.
Carreño, M. Francisca; abril, pág. 12.
Casal, Bruno; julio, pág. 8.
Castellà-Roca, Jordi; diciembre, pág. 86.
Castells, Pere; marzo, pág. 45, junio, pág. 39 y septiembre, pág. 41.
Castillo, Jesús M.; julio, pág. 10.
Catling, David C.; julio, pág. 14.
Clifton, Timothy; junio, pág. 14.
Clotet, Bonaventura; febrero, pág. 55.
Clutton-Brock, Juliet; agosto, pág. 50.
Cobos, Alberto; junio, pág. 50.
Colón Ramos, D. A.; diciembre, pág. 48.
Collins, Graham P.; agosto, pág. 13 y octubre, pág. 78.
Courty, Jean-Michel; marzo, pág. 88, abril, pág. 90, julio, pág. 90, agosto, pág. 90, septiembre, pág. 90 y diciembre, pág. 88.
Cox-Foster, Diana; junio, pág. 22.
Curado, Guillermo; julio, pág. 10.
Chamary, J. V.; agosto, pág. 28.
Cheung, Maija S.; mayo, pág. 78.
Choi, Charles Q.; febrero, pág. 6, marzo, pág. 42 y octubre, pág. 14.
Choueiri, Edgar Y.; abril, pág. 32.
Dale, Bruce E.; septiembre, pág. 44.
Davis, Mark E.; abril, pág. 24.
Day, John W., Jr.; octubre, pág. 69.
De Cabo, Rafael; abril, pág. 10.
Dobbs, David; junio, pág. 79.
Domingo, Esteban; junio, pág. 10.
Driscoll, Carlos A.; agosto, pág. 50.
Dupré, Sven; septiembre, pág. 52.
Duró, Alícia; septiembre, pág. 42.
Elizalde, Emilio; marzo, pág. 54.
Emspak, Jesse; marzo, pág. 13.
Errandonea, Daniel; diciembre, pág. 74.
Esteve, A. R.; noviembre, pág. 11.
Esteve, Miguel Angel; abril, pág. 12.
Fasano, Alessio; octubre, pág. 40.
Fernández Soto, Alberto; febrero, pág. 58.
Ferreira, Pedro G.; junio, pág. 14.
Fiala, Nathan; abril, pág. 76.
Figueroa, Enrique; julio, pág. 10.
Figueroa, Rosa Isabel; enero, pág. 34.
Fischbach, Michael A.; septiembre, pág. 22.
Fischetti, Mark; enero, pág. 92, febrero, pág. 92, marzo, pág. 92, abril, pág. 92, mayo, pág. 92, junio, pág. 92, agosto, pág. 38 y octubre, pág. 92.
Fortuño, José Manuel; mayo, pág. 36.
Fuentes, Verónica; diciembre, pág. 36.
Gabaldón, Toni; noviembre, pág. 48.
Galchen, Rivka; mayo, pág. 14.
Garcés, Esther; enero, pág. 34.
García Armada, Elena; febrero, pág. 8.

García Melendo, Enrique; noviembre, pág. 14.
García Sastre, Adolfo; noviembre, pág. 12.
García, Montse; marzo, pág. 40.
Garçon, Nathalie; diciembre, pág. 58.
Gibbs, W. Wayt; julio, pág. 12 y pág. 68.
Gil, Jesús; mayo, pág. 12.
Gili, Anna; octubre, pág. 38.
Gili, Josep-Maria; marzo, pág. 40, mayo, pág. 36 y octubre, pág. 38.
Giménez, Andrés; abril, pág. 12.
Goldman, Michel; diciembre, pág. 58.
Gómez Fernández, J. L.; septiembre, pág. 30.
Guéron, Eduardo; octubre, pág. 22.
Gutiérrez Marco, Juan Carlos; agosto, pág. 11.
Hall, Charles A. S.; octubre, pág. 69.
Hauser, Marc; noviembre, pág. 54.
Heath, James R.; abril, pág. 24.
Heckenberger, Michael J.; diciembre, pág. 40.
Henriques Gil, Nuno; agosto, pág. 8.
Hernández, Eduardo R.; diciembre, pág. 7.
Herran, Néstor; julio, pág. 9.
Herstein, Mark; marzo, pág. 73.
Higes, Mariano; octubre, pág. 8.
Hilgetag, Claus C.; abril, pág. 62.
Hood, Leroy; abril, pág. 24.
Hornyak, Tim; febrero, pág. 34.
Hough, Susan; abril, pág. 80.
Hu, Bambi; agosto, pág. 72.
Huber, George W.; septiembre, pág. 44.
Hurst, Laurence D.; agosto, pág. 28.
Ibáñez, Juan José; noviembre, pág. 72.
Ibáñez, Luis E.; octubre, pág. 60.
Iglesias Rodríguez, M.ª Débora; abril, pág. 14.
Illas, Francesc; octubre, pág. 10.
Jacobs, Gerald H.; junio, pág. 42.
Jacobs, Zenobia; noviembre, pág. 62.
Jordà, Mireia; agosto, pág. 40.
Joshi, Pankaj S.; abril, pág. 16.
Jura, Michael A.; agosto, pág. 14.
Kate, Wong; octubre, pág. 16.
Kelemen, Peter B.; mayo, pág. 50.
Keyes, Robert W.; mayo, pág. 41.
Khademhosseini, Ali; julio, pág. 82.
Kierlik, Edouard; marzo, pág. 88, abril, pág. 90, julio, pág. 90, agosto, pág. 90, septiembre, pág. 90 y diciembre, pág. 88.
Kim, Won-Young; mayo, pág. 70.
Kingsley, David M.; enero, pág. 26.
Kitchener, Andrew C.; agosto, pág. 50.
Kunzig, Robert; febrero, pág. 18.
Lacroix, Claudine; abril, pág. 53.
Lalueza Fox, Carles; mayo, pág. 11.
Langer, Robert; julio, pág. 82.
Lehrman, Sally; enero, pág. 36.
Liberati, Stefano; diciembre, pág. 12.
Linsmeier, Klaus-Dieter; agosto, pág. 44.
López Rupérez, Francisco; agosto, pág. 82.
López-Sepulcre, Andrés; enero, pág. 8.
Llorca, Javier; abril, pág. 11.
Lloyd, Seth; diciembre, pág. 82.
Macdonald, Joanne; febrero, pág. 78.
Macknik, Stephen L.; marzo, pág. 32.
MacNeilage, P. F.; septiembre, pág. 62.
Mallouk, Thomas E.; julio, pág. 30.
Marcos, María D.; marzo, pág. 11.
Marín, M. J.; noviembre, pág. 11.
Martín Hernández, R.; octubre, pág. 8.
Martínez, Julia; abril, pág. 12.
Martínez, Rafael A.; julio, pág. 60.
Martínez Fresno, María; agosto, pág. 8.
Martínez Lozano, J. A.; noviembre, pág. 11.
Martínez Máñez, Ramón; marzo, pág. 11.
Martínez Parra, Marc; enero, pág. 9.
Martínez Regúlez, Manuela; marzo, pág. 8.
Martinez-Conde, S.; marzo, pág. 32.
Matesanz, Silvia; marzo, pág. 10.
Maugeri, Leonardo; diciembre, pág. 28.
Meana, Aránzazu; octubre, pág. 8.
Millán Gasca, Ana; junio, pág. 70.
Millet, Oscar; abril, pág. 68.
Mindell, David P.; enero, pág. 66.
Miñano, Jesús; abril, pág. 12.
Miralles, Juan Antonio; junio, pág. 12.
Montón Subías, Sandra; abril, pág. 9.
Montoya Terán, Daniel; marzo, pág. 12.
Moreira, Ibério de P. R.; octubre, pág. 10.
Morowitz, Harold J.; septiembre, pág. 70.
Mukerjee, Madhusree; diciembre, pág. 10.
Nakamura, Shuji; junio, pág. 58.
Nathans, Jeremy; junio, pág. 42.
Navas, Plácido; abril, pág. 10.
Neila González, F. Javier; septiembre, pág. 9.
Nielsen, Peter E.; marzo, pág. 24.
Nistal Villán, Estanislao; noviembre, pág. 12.
Noriega, Jesús; marzo, pág. 40.
O'Brien, Stephen J.; agosto, pág. 50.
Orera, Víctor; abril, pág. 11.
Orr, H. Allen; enero, pág. 18.
Parkin, Stuart. S. P.; agosto, pág. 66.
Pavón, Diego; diciembre, pág. 8.
Peinado, Miguel A.; agosto, pág. 40.
Pollard, Katherine S.; julio, pág. 24.
Pons, José Antonio; junio, pág. 12.
Porco, Carolyn; marzo, pág. 14.
Porter, Mason A.; agosto, pág. 72.
Quidant, Romain; agosto, pág. 10.
Quintero, Adrianna; marzo, pág. 7.
Raeburn, Paul; abril, pág. 42.
Rayo, Agustín; febrero, pág. 90, abril, pág. 88, junio, pág. 90, agosto, pág. 92, octubre, pág. 90 y diciembre, pág. 90.
Regis, Ed; enero, pág. 88 y mayo, pág. 22.
Rejón, Juan David; abril, pág. 40.
Renn, Jürgen; julio, pág. 50.
Requena, Susana; noviembre, pág. 36.
Rey Benayas, José María; mayo, pág. 62.
Ricardo, Alonso; noviembre, pág. 38.
Richards, Paul G.; mayo, pág. 70.
Riordan, Michael; junio, pág. 58.
Roberts, Richard G.; noviembre, pág. 62.
Robledo, Pedro A.; diciembre, pág. 4.
Rodríguez, María Isabel; abril, pág. 40.
Rodríguez, Mercè; octubre, pág. 38.
Rodríguez Martino, Julio; junio, pág. 8.
Rodríguez Navarro, Carlos; febrero, pág. 7.
Rogers, Lesley J.; septiembre, pág. 62.
Rosas, Antonio; mayo, pág. 11.
Royo Torres, Rafael; junio, pág. 50.
Rubí, J. Miguel; febrero, pág. 28.
Ruiz Agudo, Encarnación María; febrero, pág. 7.
Ruiz Jimeno, Alberto; julio, pág. 8.
Rurali, Riccardo; diciembre, pág. 7.
Sá, Artur A.; agosto, pág. 11.
Sabater, Francesc; mayo, pág. 36.
Sachs, Jeffrey D.; enero, pág. 11, febrero, pág. 89, marzo, pág. 44, abril, pág. 44, mayo, pág. 40, julio, pág. 37, agosto, pág. 37, septiembre, pág. 89, octubre, pág. 89, noviembre, pág. 91 y diciembre, pág. 38.
Sancenón, Félix; marzo, pág. 11.
Santegoeds, Oscar; junio, pág. 40.
Sanz, Yolanda; octubre, pág. 48.
Sarmento, Hugo; julio, pág. 38.
Scott, Eugenie C.; enero, pág. 74.
Schemmel, Matthias; noviembre, pág. 26.
Schmitt, Harrison H.; septiembre, pág. 14.
Sen, Ayusman; julio, pág. 30.
Seringhaus, Michael; marzo, pág. 73.
Serrano, José; abril, pág. 12.
Shors, Tracey J.; mayo, pág. 28.
Shubin, Neil H.; enero, pág. 42.
Simmons, Nancy B.; marzo, pág. 64.
Siveter, David J.; febrero, pág. 69.
Siveter, Derek J.; febrero, pág. 69.
Smith, Eric; septiembre, pág. 70.
Sonego, Sebastiano; diciembre, pág. 12.
Soto, Juan; marzo, pág. 11.
Stefanovic, Darko; febrero, pág. 78.
Steffen, Wolfgang; septiembre, pág. 30.
Stevenson, Mario; febrero, pág. 51.
Stix, Gary; enero, pág. 12, febrero, pág. 12, septiembre, pág. 80 y diciembre, pág. 20.
Stojanovic, Milan N.; febrero, pág. 78.
Suárez, Cynthia; abril, pág. 40.
Sutton, Mark D.; febrero, pág. 69.
Szostak, Jack W.; noviembre, pág. 38.
Templado González, José; mayo, pág. 9.
Toldrá Vilardell, Fidel; diciembre, pág. 39.
Trefil, James; septiembre, pág. 70.
Treitz, Norbert; junio, pág. 86 y noviembre, página 88.
Trepat, Xavier; noviembre, pág. 16.
Turner, Michael S.; noviembre, pág. 18.
Utrillas, M. P.; noviembre, pág. 11.
Uzquiano, Gabriel; enero, pág. 90, marzo, pág. 90, mayo, pág. 90, julio, pág. 92, septiembre, pág. 92 y noviembre, pág. 92.
Vacanti, Joseph P. ; julio, pág. 82.
Vaccari, David A.; agosto, pág. 22.
Valladares, Fernando; marzo, pág. 10.
Vallortigara, G.; septiembre, pág. 62.
VanEngelsdorp, Dennis; junio, pág. 22.
Vaqué, Dolors; junio, pág. 40.
Vendrell, Marius; noviembre, pág. 10.
Viejo, Alexandre; diciembre, pág. 86.
Vila Sanjurjo, Antón; diciembre, pág. 48.
Vilar, Rocío; julio, pág. 8.
Visser, Matt; diciembre, pág. 12.
Wald, Matthew L.; mayo, pág. 56 y octubre, pág. 30.
Walsh, Christopher T.; septiembre, pág. 22.
Ward, Peter; enero, pág. 82.
Watkins, David I.; febrero, pág. 43.
Werner, Michael W.; agosto, pág. 14.
Wilson, David Sloan; enero, pág. 46.
Wilson, Edward O.; enero, pág. 46.
Wolfe, Nathan; junio, pág. 64.
Wong, Kate; enero, pág. 38, abril, pág. 8 y diciembre, pág. 6.
Zabusky, Norman J.; agosto, pág. 72.
Zahnle, Kevin J.; julio, pág. 14.
Zeilinger, Anton; junio, pág. 30.

EN EL PROXIMO NUMERO DE ENERO 2010

Energía sostenible: Objetivo 2030,

por Mark Z. Jacobson y Mark A. Delucchi

Las técnicas eólica, hidráulica y solar podrían aportar la totalidad de la energía que el planeta necesita.



Los hermanos del Sol,

por Simon F. Portegies Zwart

El Sol nació en una familia numerosa de estrellas. ¿Qué se hizo de ellas?





Causas del dolor crónico,

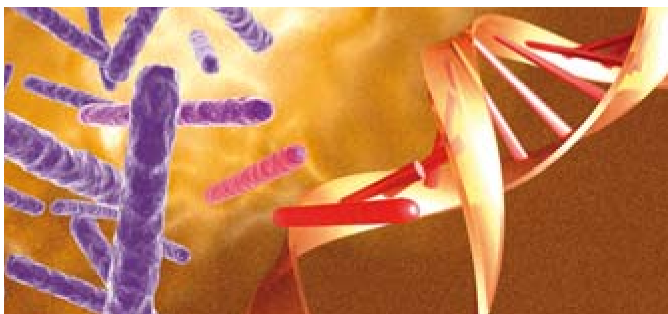
por R. Douglas Fields

La glía se encarga del mantenimiento del sistema nervioso, pero sus cuidados pueden ir demasiado lejos. Tenerla bajo control podría aliviar dolores que los medicamentos actuales no calman.

Genetica de la tuberculosis,

por Mauricio Rojas López

El control genético de la infección micobacteriana entraña una gran complejidad. Resistencia y proclividad a la enfermedad hunden su raíz en un efecto multigénico.



Nueva luz sobre el hombre de Flores,

por Kate Wong

Nuevos análisis revelan que este diminuto homínido era más extraño de lo que se pensaba. Quizá deberían revisarse los principios de la evolución humana.

